

# Die CO<sub>2</sub> neutrale Baustelle

Ein Beitrag zum Klimaschutz der österreichischen Bauwirtschaft

R. Obernosterer, L. Winkler,  
B. Lepuschitz, M. Weigert, H. Daxbeck,  
G. Goger, N. Hörzinger, N. Kisliakova

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

**36/2021**

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

### **Impressum**

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:  
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,  
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)  
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:  
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien  
Interimistischer Leiter: DI Theodor Zillner

Auszugsweiser 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/>

# Die CO<sub>2</sub> neutrale Baustelle

Ein Beitrag zum Klimaschutz der österreichischen Bauwirtschaft

Dipl.-Ing. Richard Obernosterer, Dipl.-Ing. Barbara Lepuschitz,  
Mag. Hans Daxbeck, Dipl. Ing. Nadine Hörzinger,  
Dipl. Ing. Nathalia Kisliakova  
Ressourcen Management Agentur

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerald Goger,  
Dipl. Ing. Dr.techn. Leopold Winkler, Dipl.-Ing. Maximilian Weigert  
Technische Universität Wien  
Institut für Interdisziplinäres Bauprozessmanagement  
Forschungsbereich Baubetrieb und Bauverfahrenstechnik

Villach, September 2021

Ein Projektbericht im Rahmen des Programms



des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie,  
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)



## **Vorbemerkung**

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm Stadt der Zukunft des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK). 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 BMK publiziert und elektronisch über die Plattform [www.NachhaltigWirtschaften.at](http://www.NachhaltigWirtschaften.at) zugänglich gemacht. In diesem Sinne wünschen wir allen Interessierten und AnwenderInnen eine interessante Lektüre.

DI Theodor Zillner

Interimistischer Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien  
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,  
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)



## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Kurzfassung .....</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>Abstract.....</b>	<b>11</b>
<b>3</b>	<b>Ausgangslage.....</b>	<b>13</b>
3.1.	Beschreibung der Ausgangslage .....	13
3.2.	Standes der Technik / Stand des Wissens aus eigenen Vorarbeiten.....	13
3.2.1.	Stand des Wissens aus Vorarbeiten der Ressourcen Management Agentur.....	13
3.2.2.	Stand des Wissens aus Vorarbeiten der TU Wien, Institut für Interdisziplinäres Bauprozessmanagement (IBPM).....	14
3.3.	Stand der Technik / des Wissens aus nationalen und internationalen Projekten, Vorarbeiten und Studien, Best-Practices .....	15
3.3.1.	Vorarbeiten zur CO <sub>2</sub> -Emissionsbilanzierung und Möglichkeiten der Reduktionsevaluierung .....	15
3.3.2.	Reduktionspotentiale .....	15
3.3.3.	Erzeugung von erneuerbarer Energie auf der Baustelle .....	18
<b>4</b>	<b>Projekthalt.....</b>	<b>19</b>
4.1.	Die Methodik zur Identifikation der THG Emissionen .....	19
4.1.1.	Ziel und Bewertungsgegenstände .....	19
4.1.2.	Die Definition des Systems .....	19
4.1.3.	Direkte, indirekte und diffuse THG-Emissionen .....	25
4.1.4.	Ermittlung der THG-Emissionen .....	26
4.2.	Beschreibungen der 4 fiktiven Baustellen .....	30
4.2.1.	Fiktive Baustelle 1 (fB1) – Wiener Wohnbau.....	30
4.2.2.	Fiktive Baustelle 2 (fB2) – thermische Sanierung eines Wohngebäudes .....	31
4.2.3.	Fiktive Baustelle 3 (fB3) – Infrastruktur – urbane Asphaltierarbeiten .....	32
4.2.4.	Fiktive Baustelle 4 (fB4) – Abriss eines Bürogebäudes.....	33
4.3.	Datenerfassung für die Ermittlung der THG-Emissionen.....	35
4.3.1.	Datenquellen und -erfassung für die Sachbilanz.....	35
4.3.2.	Datenquellen und -erfassung für die Wirkungsabschätzung .....	37
4.4.	Methodik zur volkswirtschaftlichen, betrieblichen und Investitions-Kostenabschätzung ....	38
4.4.1.	Methodik zur betrieblichen Investitionskostenabschätzung .....	38
4.4.2.	Methodik zur volkswirtschaftlichen Investitionskostenabschätzung.....	39
4.5.	Datenerfassung für die Investitions-Kostenabschätzung .....	40
4.5.1.	PV-Anlagen .....	40
4.5.2.	Kleinwindkraftanlagen.....	40
4.5.3.	Hybride Baumaschinen.....	40
4.5.4.	Elektrische Baumaschinen.....	40

4.5.5.	Wasserstoffbetriebene Baumaschinen .....	42
4.5.6.	Betrieb von Baumaschinen mit E-Fuels .....	42
4.5.7.	Strafzahlungen für verfehlte Klimaziele .....	42
4.6.	Methodik der Expert:innenumfrage .....	42
4.7.	CO <sub>2</sub> -Einsparpotenziale auf Baustellen .....	43
4.7.1.	Methodik zur Bewertung der Einsparpotentiale .....	45
4.7.2.	Verringerung durch organisatorische Maßnahmen .....	47
4.7.3.	Verringerung durch technologische Entwicklungen.....	52
4.7.4.	Verringerung durch Erzeugung erneuerbarer Energie auf der Baustelle.....	58
4.7.5.	Verringerung durch Zukauf von erneuerbarer Energie .....	61
4.7.6.	CO <sub>2</sub> -Kompensation .....	62
4.8.	Beschreibung der Szenarien der 4 fiktiven Baustellen .....	66
4.8.1.	Szenarien 2023 .....	66
4.8.2.	Szenario 2050 .....	69
<b>5</b>	<b>Ergebnisse .....</b>	<b>71</b>
5.1.	THG-Emissionen IST der 4 fiktiven Baustellen .....	71
5.1.1.	Fiktive Baustelle 1 (fB1) – Wiener Wohnbau.....	71
5.1.2.	Fiktive Baustelle 2 (fB2) – thermische Sanierung eines Wohngebäudes .....	74
5.1.3.	Fiktive Baustelle 3 (fB3) – Infrastruktur / urbane Asphaltierarbeiten.....	75
5.1.4.	Fiktive Baustelle 4 (fB4) – Abriss eines Bürogebäudes.....	77
5.2.	THG-Emissionen Szenarien 2023 der 4 fiktiven Baustellen .....	79
5.2.1.	Fiktive Baustelle 1 (fB1) – Wiener Wohnbau.....	79
5.2.2.	Fiktive Baustelle 2 (fB2) – thermische Sanierung eines Wohngebäudes .....	80
5.2.3.	Fiktive Baustelle 3 (fB3) – Infrastruktur, urbane Asphaltierarbeiten .....	81
5.2.4.	Fiktive Baustelle 4 (fB4) – Abriss eines Bürogebäudes.....	82
5.3.	Ergebnisse der Investitions-Kostenabschätzung .....	83
5.3.1.	Erläuterungen zu den Maßnahmen.....	83
5.3.2.	Rückschlüsse auf die Volkswirtschaft .....	86
5.4.	Ergebnisse der Expert:innenumfrage .....	86
5.5.	Hemmnisse bei der Umsetzung der CO <sub>2</sub> -freien Baustelle .....	91
5.5.1.	Hemmnisse im Bereich der organisatorischen Maßnahmen .....	92
5.5.2.	Hemmnisse im Bereich der technologischen Entwicklungen.....	92
5.5.3.	Hemmnisse im Bereich der Erzeugung erneuerbarer Energie auf der Baustelle .....	93
5.5.4.	Hemmnisse im Bereich des Zukaufs erneuerbarer Energie (Strom) .....	94
5.5.5.	Hemmnisse im Bereich der CO <sub>2</sub> -Kompensation .....	95
5.6.	Leitfaden zur Verringerung der THG-Emissionen auf Baustellen .....	95
5.6.1.	Transportprozesse .....	95
5.6.2.	Prozesse vor Ort (Baustellenaktivitäten).....	96



5.7. Beitrag des Projekts zu den Gesamtzielen des Programms „Stadt der Zukunft“ .....	97
<b>6 Schlussfolgerungen .....</b>	<b>98</b>
6.1. Schlussfolgerungen aus der Analyse der 4 fiktiven Baustellen.....	98
6.2. Schlussfolgerungen aus der Investitions-Kostenabschätzung .....	100
6.3. Schlussfolgerungen aus der Expert:innenumfrage und den Expert:innengesprächen .....	101
<b>7 Ausblick und Empfehlungen .....</b>	<b>103</b>
7.1. Notwendigen (Weiter-) Entwicklungen zur Umsetzung einer CO <sub>2</sub> -neutralen Baustelle .....	103
7.1.1. Notwendige (Weiter-) Entwicklungen bei Ermittlung der THG-Emissionen .....	103
7.1.2. Notwendige organisatorische (Weiter-) Entwicklungen .....	104
7.1.3. Notwendige technische (Weiter-) Entwicklungen.....	104
7.2. Weiterer Forschungsbedarf zur Realisierung der CO <sub>2</sub> -neutralen Baustelle .....	105
<b>8 Verzeichnisse.....</b>	<b>107</b>
<b>9 Anhang.....</b>	<b>116</b>
9.1. Data Management Plan (DMP).....	116



# 1 Kurzfassung

## **Motivation und Forschungsfrage**

Das im Rahmen des Forschungsprogramms „Stadt der Zukunft“ in der 7. Ausschreibung des Bundesministeriums für Klimaschutz (BMK) durch die FFG geförderte F&E-Projekt „CO<sub>2</sub>-neutrale Baustelle“ des Forschungsbereichs Baubetrieb und Bauverfahrenstechnik an der TU Wien und der Ressourcen Management Agentur (RMA) identifizierte die Chancen und Hemmnisse einer klimaneutralen Baustellenführung.

## **Ausgangssituation / Status Quo**

Die Reduktion der Treibhausgase ist heute ein gemeinsames globales Ziel. Sowohl die EU als auch Österreich haben diesbezüglich ehrgeizige Ziele: die Erreichung der kompletten Klimaneutralität bis 2050 (EU) bzw. 2040 (Österreich). Der Gebäudesektor konnte in den vergangenen Jahren starke Reduktionen bei den Treibhausgasemissionen erzielen. Trotzdem bestehen nach wie vor der Bedarf und das Potential für weitere Einsparungen. Die CO<sub>2</sub>-neutrale Baustelle stellt hier einen wichtigen Baustein im Lebenszyklus eines Bauwerks dar, der in der Vergangenheit noch nicht umfassend betrachtet wurde.

## **Projekt-Inhalte und Zielsetzungen**

Ziel dieses Projektes war es, eine Methodik zur Identifikation der anfallenden Treibhausgas-Emissionen auf Baustellen in Anlehnung an bestehende Normen zu entwickeln. In einem weiteren Schritt sollten Möglichkeiten zur Einsparung dieser Emissionen aufgezeigt und deren Potentiale qualitativ und – wo möglich – quantitativ bewertet werden. In dieser Forschungsdienstleistung wurde der Fokus auf die Reduktion von Treibhausgasen gelegt. Andere Umwelt- und Gesundheitsaspekte oder Reboundeffekte sind außerhalb des Forschungsumfangs der gegenständlichen Studie.

## **Methodische Vorgehensweise**

Die gestellten Forschungsfragen wurden mittels einer nationalen und internationalen Literaturanalyse, Interviews mit Expertinnen und Experten aus der Baubranche, einer breit angelegten Online-Befragung, sowie einem Workshop in der Arbeit beantwortet. Dadurch konnte die die F&E-Qualität und eine Einbettung in die österreichische Bauwirtschaft sichergestellt werden.

Zurzeit existieren noch keine standardisierten Regelwerke, um alle direkten & indirekten CO<sub>2</sub>-Emissionen auf einer Baustelle zu identifizieren und notwendige Rahmenbedingungen sowie Technologien für deren Substituierung, Kompensation oder Adaption aufzuzeigen. Daher wurde zu Beginn für vier fiktive urbane Baustellen der jeweilige IST-Zustand der THG-Emissionen auf Basis festgelegter Systemgrenzen ermittelt. Die definierten Systeme für Neubau, Sanierung und Rückbau beinhalten sowohl Prozesse auf der Baustelle als auch Transportprozesse von und zur Baustelle. Bei den Baustellen handelt es sich um einen neuen Hochbau, eine thermische Sanierung eines Wohngebäudes, urbane Asphaltierungsarbeiten und einen Abriss eines Bürogebäudes. Für die vier Baustellen wurden Daten von realen, bereits fertiggestellten Baustellen herangezogen und durch Daten aus der Literatur bzw. Einschätzungen von Expert:innen vervollständigt. Aufbauend auf dem IST-Zustand erstellten die Autor:innen Szenarien für die Verringerung der THG-Emissionen bis zur

„CO<sub>2</sub>-neutralen Baustelle“. Die Szenarien zeigen mögliche kurzfristige Reduzierungen bis 2023 und langfristige Reduzierungen bis 2050 auf.

### **Ergebnisse und Schlussfolgerungen**

Die Erreichung einer CO<sub>2</sub>-neutralen Baustelle gliedert sich in fünf Schritte, wobei vier Schritte zur Verringerung der THG-Emissionen beitragen. Die Schritte zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen sind organisatorische Maßnahmen, technologische Entwicklungen, Erzeugung von erneuerbarer Energie auf der Baustelle und der Zukauf von erneuerbarer Energie. Als fünfter Schritt müssen verbleibende CO<sub>2</sub>-Emissionen finanziell kompensiert werden.

Die Ergebnisse der THG-Emissionen der vier fiktiven Baustellen zeigen, dass die wesentlichen Energieträger für die Baustellenaktivitäten Diesel und Strom sind. Einen großen Anteil an den Treibhausgas-Emissionen bei der Bautätigkeit bildet der An- und Abtransport von Materialien per LKW. Die Anteile variieren nach Baustellentyp.

Die gerechneten Szenarien für 2023 zeigen, dass bereits Maßnahmen zur Verfügung stehen, um kurzfristig CO<sub>2</sub>-Einsparungen umzusetzen. Die Verringerungspotentiale für Treibhausgas-Emissionen auf Baustellen für 2023 reichen je nach Baustellentyp und Rahmenbedingungen von 21 % bis 52 %. Die größten Einsparpotentiale liegen bei der Reduktion von Transportdistanzen, alternativen Treibstoffen/Antriebsformen und dem Zukauf von Strom aus erneuerbaren Quellen. Spezifische Maßnahmen können aufgrund der individuellen Baustelle nicht pauschal vorgegeben werden, sondern müssen immer auf jede einzelne Baustelle abgestimmt werden.

Parallel dazu wurden Kosten/Nutzen-Vorteile einer CO<sub>2</sub>-neutralen Baustellen anhand einer Investitionskostenabschätzung aufgezeigt und quantifiziert. Je nach Vorhaltezeiten sind gegenwärtig einige elektrisch betriebene Kleinbagger günstiger als dieselbetriebene Geräte. In Zukunft könnte sich ein wirtschaftlicher Nutzen über den Lebenszyklus großer Elektrobaugeräte ergeben.

Die wesentlichen Hemmnisse zur Erreichung einer CO<sub>2</sub>-neutralen Baustelle sind die entstehenden Kosten und ein Mangel an erfolgreich durchgeführten Pilotprojekten mit praxistauglichen Alternativen. Die Baubranche sieht Fördermaßnahmen, Bewusstseinsbildung und Änderungen bei Gesetzen und Vorschriften als Chance für die erfolgreiche Umsetzung von CO<sub>2</sub>-neutralen Baustellen. Die breite Kenntnis digitaler Technologien zur Optimierung von Bauprojekten in Planungs- und Bauunternehmen muss weiter vorangetrieben werden, damit BIM, Taktplanung und LEAN Management-Methoden in der Praxis zu Einsparung von CO<sub>2</sub>-Emissionen führen.

### **Ausblick**

Für die Zukunft empfehlen die Autor:innen die Entwicklung einer standardisierten Datenerfassung zur vereinfachten Berechnung der THG-Emissionen, die es den Baubeteiligten erleichtert, THG-Emissionen effizient zu erfassen und Maßnahmen zu deren Reduktion oder Verlagerung zu planen und umzusetzen. Die fiktiven Baustellen müssen im Zuge von Demonstrationsprojekten zu realen CO<sub>2</sub>-neutralen Baustellen übergeführt werden. Dabei sollten in Feldforschungen möglichst viele organisatorische und technische Maßnahmen getestet werden. Es wird empfohlen, in der Umsetzung einer CO<sub>2</sub>-neutralen Baustelle verpflichtende Verringerungsmaßnahmen, weitere Ökoindikatoren sowie Aspekte der Ökologie, wie Ressourceneffizienz und Kreislaufwirtschaft einzubeziehen.

## 2 Abstract

### **Motivation and research question**

The R&D project "CO<sub>2</sub>-neutrale Baustelle", funded by the FFG as part of the research program "City of tomorrow" in the 7th call for proposals of The Federal Ministry for Climate Action (BMK), of the research department Construction Process and Methods at the TU Wien and the Resource Management Agency (RMA) identified the opportunities and obstacles of climate-neutral construction sites.

### **Initial situation/status quo**

Nowadays reducing greenhouse gases is a global joint effort. In this regard the European Union as well as Austria are pursuing an ambitious goal: reaching so-called climate-neutrality until 2050 (EU) and 2040 (Austria) respectively. In previous years the building sector could reach substantial reduction in greenhouse gases. Nevertheless, there still exists need and potential for additional reductions. Therefore, the carbon neutral construction site represents a crucial puzzle stone within the object lifecycle that has not been sufficiently considered in the past.

### **Project contents and objectives**

The aim of this project was to develop a methodology for identifying the greenhouse gas emissions generated on construction sites based on existing standards. In a further step, possibilities for reducing these emissions were to be identified and their potential evaluated qualitatively and - where possible - quantitatively. In the presented report, the focus was on the reduction of greenhouse gases. Other environmental and health aspects or rebound effects are outside the research scope of the present study.

### **Methodical procedure**

The research questions posed were answered by means of a national and international literature review, interviews with experts from the construction industry, an online survey, and a workshop. These methods were implemented to ensure high research quality and applicability in the Austrian construction industry.

Currently, there are no standardized regulations to identify all direct and indirect CO<sub>2</sub> emissions on a construction site and to identify necessary framework conditions as well as technologies for their substitution, compensation, or adaptation. Therefore, at the beginning, the respective current state of GHG emissions was determined for four fictitious urban construction sites based on defined system boundaries. The systems for construction, renovation, and demolition include processes on the construction site as well as transport processes to and from the construction site. The construction sites are a new residential building, an energy efficient renovation of a residential building, urban infrastructure asphaltting works, and a demolition of an office building. For the four construction sites, data from real, already completed construction sites were used and supplemented by data from the literature or assessments by experts. Based on this defined current state of GHG emissions, the authors created scenarios for reducing GHG emissions until a CO<sub>2</sub>-neutral construction site is achieved. The scenarios were calculated to show potential short-term reductions in 2023, and long-term reductions by 2050.

## **Results and conclusions**

In this project, achieving a CO<sub>2</sub>-neutral construction site is divided into five steps, with four steps contributing to the reduction of GHG emissions on site. The steps to reduce CO<sub>2</sub> emissions are organizational measures, technological developments, generation of renewable energy on the construction site, and the purchase of renewable energy. As a fifth step, remaining CO<sub>2</sub> emissions must be financially compensated.

The GHG emissions for the four fictitious construction sites show that the major energy sources for construction site activities are diesel and electricity. A major contributor to GHG emissions from construction activities is the transportation of materials to and from the site by truck. The proportions vary by construction site type.

The calculated scenarios for 2023 show that measures are already available to implement CO<sub>2</sub> savings in the short term. The reduction potential for greenhouse gas emissions at construction sites for 2023 range from 21% to 52%, depending on the type of construction site and general conditions.

The greatest savings potential is in the reduction of transport distances, alternative fuels/motors, and the purchase of electricity from renewable sources. Specific measures cannot be prescribed in a blanket manner due to the individual construction site but must always be tailored.

In parallel, cost/benefit advantages of a CO<sub>2</sub>-neutral construction site were demonstrated by the authors and quantified by means of an investment cost estimate. Depending on time of use, some small electric-powered excavators are currently less expensive than diesel-powered equipment. In the future, there could be an economic benefit over the life cycle of large electric construction equipment.

The main barriers to achieving a CO<sub>2</sub>-neutral construction site are the costs incurred and the lack of successfully implemented pilot projects that test practical alternatives. The conducted survey showed that the construction industry sees subsidies, awareness raising, and changes in laws and regulations as opportunities for the successful implementation of CO<sub>2</sub>-neutral construction sites. Design and construction companies must advance their understanding and use of digital technologies for optimizing construction projects so that BIM, cycle planning, and LEAN management methods can lead to CO<sub>2</sub> emission savings in practice.

## **Outlook**

For the future, the authors recommend the development of standardized data collection for the simplified calculation of GHG emissions, which will make it easier for construction stakeholders to efficiently record GHG emissions and to plan and implement measures to reduce or shift them. The fictitious construction sites must be converted to real CO<sub>2</sub>-neutral construction sites as funded pilot projects. As many different organizational and variable technical measures should be tested in field research. It is recommended to include mandatory reduction measures, further eco-indicators as well as aspects of ecology – such as resource efficiency and circular economy – in the implementation of a CO<sub>2</sub>-neutral construction site.

# 3 Ausgangslage

## 3.1. Beschreibung der Ausgangslage

Die Reduktion der Treibhausgase ist heute ein globales Ziel. Sowohl die EU als auch Österreich haben ehrgeizige Ziele bezüglich der Erreichung der Klimaneutralität. Wie in der österreichischen Klima- und Energiestrategie „mission 2030“ (BMNT und BMVIT, 2018) dargelegt, konnte der Gebäudesektor in den vergangenen Jahren deutliche Reduktionen bei den Treibhausgasemissionen erzielen. Trotzdem bestehen nach wie vor der Bedarf und das Potential für weitere Einsparungen. Die CO<sub>2</sub>-neutrale Baustelle stellt hier einen Baustein im Lebenszyklus eines Gebäudes dar, der in der Vergangenheit noch nicht umfassend betrachtet wurde. Hier besteht praxisbezogener Forschungs-, Entwicklungs- und Innovationsbedarf, der kurz-, mittel- und langfristige Maßnahmen identifiziert und Möglichkeiten zur Umsetzung aufzeigt. Dieser Forschungsbedarf wurde von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) anhand der Zielvorgaben für diese F&E-Dienstleistung (Stadt der Zukunft, 7. Ausschreibung) näher definiert:

- „Ziel der F&E-Dienstleistung ist es, alle entstehenden Emissionen (direkte & indirekte) auf einer Baustelle - ungeachtet der Baustellengröße - zu identifizieren und
- notwendige Rahmenbedingungen sowie Technologien für deren Substituierung, Kompensation oder Adaption aufzuzeigen.
- Gleichzeitig sollen Mehrwerte wie etwaige Kosten- und Nutzen-Vorteile einer CO<sub>2</sub>-neutralen Baustellen aufgezeigt und quantifiziert werden.
- Die Studie soll sich vor allem mit der Baustellenabwicklung im urbanen Raum auseinandersetzen, Paradigmen des Urban Mining und Lean Management miteinbeziehen und weiteren Forschungs- & Technologieentwicklungsbedarf ableiten.“ (Bodisch, et al., 2019, S. 36)

## 3.2. Standes der Technik / Stand des Wissens aus eigenen Vorarbeiten

### 3.2.1. Stand des Wissens aus Vorarbeiten der Ressourcen Management Agentur

Die Ressourcen Management Agentur (RMA) beschäftigt sich unmittelbar und ausschließlich mit Forschungs- und Lehraufgaben für die österreichische Wissenschaft und Wirtschaft. Alle von der RMA bearbeiteten Unterlagen sind öffentlich zugänglich (RMA Bibliothek, Homepage der RMA oder bei Behörden und Auftraggebern). Die RMA bearbeitet folgende Forschungsschwerpunkte:

- Ressourcen-Management, Regionaler Stoffhaushalt (Urban Future, City Mining)
- Abfall- und Abwasserwirtschaft
- Produkt- und regionalbezogene Stoff-, Energie- und Ökobilanzen
- Nachhaltiges Bauen
- Nachhaltige Ernährung

Die RMA war beispielsweise in den Bietergemeinschaften der FFG-Projekte „EM Städte - Monitoring und Evaluierung von städtischen Energieflüssen (FFG-Nr: 873575)<sup>1</sup>“ und „R-Bau - Entwicklung einer praxisorientierten replizierbaren Rückbaustrategie zur Forcierung des verwertungsorientierten Rückbaus im Wohnbau (FFG-Nr: 845214)<sup>2</sup>“ beteiligt. Während sich ersteres mit der Erstellung von Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanzen von Städten beschäftigte, wurde bei zweiterem unter Einbindung relevanter Stakeholder eine Rückbaustrategie zur Forcierung des verwertungsorientierten Rückbaus im Wohnbau entwickelt.

Auch bei den KLIEN-Projekten „Vision 2050 - Villach strives for innovative energy concepts (K11NE2F00012)<sup>3</sup>“ und Vision Step I - Realising Villach's Smart City Vision – Step I (KR11SE2F00707)<sup>4</sup>“ war die RMA im Projektkonsortium. Bei diesen Projekten wurden Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanzen für die Stadt Villach inkl. Zukunftsszenarien berechnet, eine Vision, eine Roadmap und ein Action Plan für die Stadt Villach im Zuge eines Stakeholder-Prozesses erstellt sowie technologische und soziale Lösungsansätze entwickelt und getestet (Smart Grids, Neue Finanzierungs- und Geschäftsmodelle, Bürgerbeteiligung). Derzeit knüpft die RMA im Projekt „Villach Fit 4 Urban Mission“<sup>5</sup> in Zusammenarbeit mit der Stadt Villach an diese Ergebnisse an; mit dem Ziel Villach, darauf vorzubereiten, Strategien, Maßnahmen und den notwendigen Kapazitätsaufbau für die Erreichung der Klimaneutralität zu entwickeln.

### **3.2.2. Stand des Wissens aus Vorarbeiten der TU Wien, Institut für Interdisziplinäres Bauprozessmanagement (IBPM)**

Die Kompetenz und Expertise des IBPM ist auf die bautechnischen sowie bauglogistischen Themen fokussiert. In einer im Jahr 2018 erschienen Studie wurden die Chancen und Herausforderungen von Digitalisierung in der Ausführungsphase beleuchtet (Goger, Piskernik, & Urban, 2017). Neben einem durchgängigen Einsatz von BIM, diversen Vereinfachungen durch Digitalisierung und selbststeuernde Geräte und Maschinen wurde auch eine effizientere Baustellenlogistik als Folge der fortschreitenden Digitalisierung erkannt.

In seiner 2016 abgeschlossenen Dissertation „Betriebsstoffverbrauch von Baumaschinen als Faktor einer ökoeffizienten Bauprozessoptimierung“ untersucht Christoph Winkler die genauen Verbrauchswerte für einzelne Baumaschinen, abhängig von ihrer Leistung. Er grenzt darin gängige Rechenwerte aus vorhandener Literatur durch Feldversuche weiter ein und zeigt, dass die gängigen Kalkulationswerte zu hoch angesetzt sind (diese werden von Baufirmen für die Kostenkalkulation, nicht für CO<sub>2</sub>-Bilanzen verwendet). Weiters behandelt die Dissertation Schadstoffemissionen von Baumaschinen, darunter auch Kohlendioxid(-äquivalente).

---

<sup>1</sup> <https://nachhaltigwirtschaften.at/de/sdz/projekte/em-staedte.php>

<sup>2</sup> <https://nachhaltigwirtschaften.at/de/sdz/projekte/r-bau-entwicklung-einer-praxisorientierten-replizierbaren-rueckbaustrategie-zur-forcierung-des-verwertungsorientierten-rueckbaus-im-wohnbau.php>

<sup>3</sup> <https://docplayer.org/38391410-Vision-2050-villach-strives-for-innovative-energy-concepts.html>

<sup>4</sup> <https://smartcities.at/en/projects/vision-step-i-villach/>

<sup>5</sup> <https://nachhaltigwirtschaften.at/de/sdz/projekte/vil-fit.php>



Derzeit befindet sich parallel eine Studie über „Sustainability in Tunneling“<sup>6</sup> in Arbeit. In der Mapping Study, die sich auf internationale Publikationen bezieht, wurde erkannt, dass der Fokus der Forschung in Bezug auf Nachhaltigkeit von Tunnelbaustellen auf die Erfassung der CO<sub>2</sub>-Emissionen der Lebensphase mittels LCA-Studien liegt. Konkrete Reduktionsmaßnahmen in der Lebenszyklusphase der Baustellenausführung wurden noch nicht wissenschaftlich evaluiert.

### **3.3. Stand der Technik / des Wissens aus nationalen und internationalen Projekten, Vorarbeiten und Studien, Best-Practices**

#### **3.3.1. Vorarbeiten zur CO<sub>2</sub>-Emissionsbilanzierung und Möglichkeiten der Reduktionsevaluierung**

Die Erfassung der CO<sub>2</sub>-Emissionen auf Baustellen wurde schon in vorhergegangenen Studien thematisiert und behandelt. In Österreich wurden im Projekt RUMBA (Projektleitstelle der MD-Stadtbaudirektion der Stadt Wien, 2004) Richtlinien für eine umweltfreundliche Baustellenabwicklung erarbeitet und Maßnahmen zur Reduktion von Schadstoffen und insbesondere auch von CO<sub>2</sub>-Emissionen vorgeschlagen. Die Maßnahmen werden nach Baustellentypus ausgewertet und anhand von Fallbeispielen ihre Wirksamkeit und Kosten überprüft. Die Effektivität wird außerdem anhand eines Monitoringprojekts getestet. Aus den gewonnenen Erkenntnissen wurde ein Leitfaden zur umweltfreundlichen Baustellenabwicklung erstellt. Das österreichische Umweltbundesamt erstellte drei Jahre später ein Grundlagendokument zur Luftschadstoffreduktion bei Baustellen, das vor allem auf organisatorische Maßnahmen eingeht und Textbausteine für ökologische Bauausschreibungen beinhaltet (Nagl, Kroiss, & Fössl, 2009). Einen weiteren Meilenstein zur CO<sub>2</sub>-neutrale Baustellenführung wurde in der Schweiz durch die CO<sub>2</sub>-neutrale Errichtung der Umweltarena Spreitenbach 2010 gesetzt (Schmid & Keuchel, 2012).

Methoden zur Messung und Bewertung der Kohlenstoffbilanz von Baustellen und Anwendungen auf realen Baustellen rückten in den letzten Jahren auch international verstärkt in den Fokus (Ren, Chrysostomou, & Price, 2012), (Seo, Kim, Hong, & Kim, 2016). Andere Studien befassten sich mit der Emissionsbilanz einzelner Aspekte der Bauausführung, zum Beispiel der Herstellung von Asphaltoberflächen (Peng, Cai, Yin, Li, & Zhan, 2015). Rezente internationale Studien zur vollständigen Identifizierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen umfassen jene von Hong et al. In dieser Arbeit wurde ein auf machine-learning basierter Algorithmus entwickelt, um Abgase und Energieverbrauch auf Baustellen in Echtzeit zu messen (Hong, Hong, Kang, & Lee, 2019).

#### **3.3.2. Reduktionspotentiale**

##### **Organisatorische Maßnahmen**

In der Literatur finden sich zahlreiche Hinweise, dass durch Digitalisierung, bessere Planungs- und Managementmethoden sowie Schulung des Baustellenpersonals die Bauzeit reduziert werden kann. Expert:innen gehen davon aus, dass die Bauzeit in Abhängigkeit der Baustellengröße durch den konsequenten Einsatz von BIM um 5 – 25 % verkürzt werden kann (Hiebl, 2018). Durch die kürzere

---

<sup>6</sup> Huymajer et al., Sustainability in Tunneling, bei „Cleaner Production“ eingereicht, noch nicht veröffentlicht

Bauzeit können indirekt und direkte Emissionen reduziert werden. Die Leistungsgeräte arbeiten insgesamt gleich lange und gleich viel, befinden sich aber in einem dichteren Takt wodurch die Vorhaltegeräte und Bauleistungsunabhängigen Emittenten (Bauheizung, ...) kürzer benötigt werden.

Weitere Einsparungen können durch das Verlegen der Bauzeit in milde Monate erreicht werden. Die Bauheizung ist vor allem bei der gängigen Methode der elektrischen Heizung für CO<sub>2</sub>-Emissionen verantwortlich. Auch die Kühlung der Baubüros benötigt elektrische Energie. Hier ist das Einsparpotential von der Bauzeit abhängig. Bei sehr kurzen Baustellen kann die Bauzeit fast zur Gänze in die „milden“ Monate verlegt werden. Bei langen Baustellen wird das Einsparpotential hingegen sukzessive geringer. Neben der Bauzeit hängt der Energieeinsatz auch stark vom örtlichen Klima und dessen saisonalen Schwankungen ab. In der Literatur finden sich wenig Angaben zu Einsparpotentialen auf Grund geänderter Bauzeiten. Bei kurzen Baustellen kann die Einsparung der Energie für Heizen und Kühlen bis zu 21 % betragen (Li, Zhang, Mah, & Yu, 2017).

Durch Einsatz von besser geschultem oder erfahrenerem Personal können Maschinen effizienter bedient werden. Die Ausnutzung der Baumaschinen kann hierdurch bis zu doppelt so hoch sein (Winkler, 2017). Die Gerätegröße sollte immer optimal auf den Einsatzort abgestimmt sein, um durch höchstmögliche Effizienz nicht nur Geld, sondern auch Emissionen einzusparen.

### **Transporte und Baustellentransporte**

Baustellen zuzurechnende Transporte machen zwischen 7 % und 20 % der Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor aus (Romm & Korab, 2007). Entgeltsysteme führen auf Seite der Transportunternehmen zur Notwendigkeit einer besseren Lieferlogistik. Alternative Transportwege, wie zum Beispiel Gleis- oder Wasserstraßenanschlüsse werden besser ausgenutzt. Die Einrichtung von Förderbändern, wie sie im Bergbau verwendet werden, kann in gewissen Fällen eine Einsparung bewirken. Auch eine Erhöhung des Beladungsgrades von LKW würde zu einer besseren Ausnutzung und damit zu weniger CO<sub>2</sub>-Emissionen führen. Vergabekriterien nach dem Bestbieterprinzip, die kurze Transportdistanzen sowie emissionsarme Transportwege belohnen, setzen die Bauunternehmen unter Druck, hier aktiv tätig zu werden und Transporte klimafreundlicher zu gestalten. Baustellentransporte und Baustellenkurztransporte (innerhalb des Standorts) können durch den Einsatz digitaler Hilfsmittel verringert oder sogar gänzlich vermieden werden. Baustellentransporte können außerdem durch den Einsatz größerer Transporteinheiten, Verarbeitung von Material direkt auf der Baustelle (z.B. als Verfüllmaterial) oder das Vermeiden von Leerfahrten verringert werden. Baustellenkurztransporte entstehen durch ineffiziente Anlieferung von Material oder Abtransport von Abfällen. Durch eine gut geplante Lieferlogistik kann ein Großteil dadurch vermieden werden (Projektleitstelle der MD-Stadtbaudirektion der Stadt Wien, 2004).

Für die Zukunft ist der Ausstieg aus fossilen Antrieben geplant. Möglichkeiten zukünftiger Antriebe sind die Verwendung von E-Fuels oder Wasserstoff als Kraftstoff und die Elektrifizierung. E-Fuels sind synthetische Kohlenwasserstoffe, die aus elektrischer Energie, Wasserstoff und (Luft-)CO<sub>2</sub> hergestellt werden. Um als klimaneutral zu gelten, muss der elektrische Strom zur Erzeugung aus nachhaltigen Quellen kommen. Durch das „Absaugen“ des CO<sub>2</sub> aus der Luft entsteht ein geschlossener Kreislauf, sodass beim Verbrennen im Motor trotz eines CO<sub>2</sub>-Ausstoßes von CO<sub>2</sub>-Neutralität gesprochen werden kann (Maus, W. (Hrsg.), 2019). Die Erzeugung der E-Fuels wird in Zukunft vermutlich in Ländern vorzustattgehen, die eine höhere Sonneneinstrahlung haben als Länder in Mitteleuropa (Machhammer, 2021). E-Fuels könnten einen sehr großen Anteil am Ausstieg aus fossilen Kraft- und Brennstoffen haben (Ausfelder & Wagemann, 2020).

Wasserstoff als Kraftstoff ist derzeit relativ teuer und der Preis mit 0,45 € - 2,70 € pro kg volatil (Lahnaoui, Wulf, Heinrichs, & Dalmazzone, 2019). Durch seine hohe Energiedichte bietet er jedoch eine gute Reichweite für Fahrzeuge von 800 bis 1200 km pro Brennstoffzelle und einer Nachfüllzeit für Wasserstoff von ca. 15 Minuten (Nikola, 2020). Wasserstoff gilt derzeit als aussichtsreicher Kandidat als Ersatz für Diesel. In der Schweiz sind derzeit insgesamt sieben Wasserstoff-LKWs der Firma Hyundai im Einsatz (Schaal, 2020). Auch die Firma MAN hat einen wasserstoffbetriebenen Prototypen entwickelt, der ab 2021 zum Einsatz kommen soll (Enzian, 2021).

Elektrisch betriebene LKWs haben das Potential, einen großen Anteil des Schwerverkehrs auszumachen, vorausgesetzt, das Elektrizitätsnetz zieht mit den Anforderungen mit (Liimatainen, van Vliet, & Aplyn, 2019). Es gibt bereits eine Vielzahl elektrischer LKWs am Markt, darunter u.a. Modelle von den Firmen MAN und Volvo. Von der Firma Liebherr wurde ein elektrischer Transportbetonmischer entwickelt, der seit 2020 in der Schweiz im Einsatz ist (Liebherr-Mischtechnik GmbH, 2019).

### **Baumaschinen und Geräte**

Durch den Einsatz von erfahrenem und qualifiziertem Personal kann eine bessere Effizienz der Maschinen und somit eine Reduktion der Emissionen erreicht werden (Winkler, 2017). Eine weitere Möglichkeit, Emissionen zu vermeiden, ist die Verwendung von elektrisch betriebenen Baumaschinen bzw. Baugeräten. Die technologische Einsatzfähigkeit von elektrischen Baumaschinen hängt von mehreren Faktoren ab. Auch hybride Antriebe, wo der Elektromotor unterstützend wirkt oder einzelne Maschinenelemente antreibt, existieren bereits.

Eine weitere Alternative sind Biokraftstoffe. Bio-Diesel ist etwas schwerer als gewöhnlicher Diesel und hat eine etwas geringere Energiedichte. Er kann in normale Dieselmotoren ohne vorherige Modifikation eingefüllt werden. E-Fuels werden in Baumaschinen derzeit noch nicht angewandt, wären aber mit Modifikationen im Injektionssystem der Dieselmotoren möglich und zeigen gute Ergebnisse hinsichtlich Leistungsfähigkeit und Emissionsreduktion (Damyanov, et al., 2018).

### **Effizienzsteigerung**

Mit herkömmlichen Kraftstoffen und Antrieben können CO<sub>2</sub>-Emissionen durch sparsamere Maschinen zumindest verringert werden. Technologien, die hierbei hilfreich sind:

- Abschaltautomatik
- Intelligente Verdichtungswalzen, die automatisch Lastanpassungen vornehmen, verursachen bis zu 20 % weniger Emissionen im Vergleich zu herkömmlichen Walzen (Committee for European Construction Equipment and CEMA European Agricultural Machinery CECE, 2018)
- Nicht-aktive Maschinenelemente abschalten
- Rekuperation – Rückgewinnung von „überschüssiger“ kinetischer Energie.

### **Abfallwirtschaft**

Bei der Abfallentsorgung sollten möglichst große Container verwendet werden, da dadurch die Anzahl der Fahrten reduziert werden kann. Die Aufbereitung von Abbruchmaterial auf der Baustelle kann vor allem dann einen großen ökologischen Benefit bringen, wenn das Recyclingmaterial direkt vor Ort oder in einer sehr nahen Baustelle eingesetzt werden kann (Projektleitstelle der MD-Stadtbaudirektion der Stadt Wien, 2004).

## **Heizen**

Eine weitere CO<sub>2</sub>-Quelle stellt die Bauheizung dar. Momentan wird zum Heizen des Rohbaus hauptsächlich elektrische Energie verwendet. Eine Möglichkeit, diese Emissionen zu verringern, ist die Verwendung der späteren Gebäudeheizung bereits im Bauzustand. Wird zum Beispiel die Baustellenheizung bereits mit Fernwärme betrieben, reduziert sich der Ausstoß an CO<sub>2</sub> (Energy Norway, 2018) (Climate Agency, City of Oslo, 2018). Hersteller geben an, dass Infrarot-Heizsysteme durch einen höheren Wirkungsgrad effizienter sind als herkömmliche E-Heizungen (ETAPART, 2021).

### **3.3.3. Erzeugung von erneuerbarer Energie auf der Baustelle**

In Spreitenbach im Schweizer Kanton Aargau wurden bereits Maßnahmen zur Erzeugung von Solar- und Windenergie umgesetzt. So wurde beispielsweise der Baukran mit Strom aus einem darauf montierten Windrad produziert, und auf den Baucontainern wurden Solarzellen ebenfalls zur Stromerzeugung aufgesetzt. (Minder, 2010)

# 4 Projektinhalt

## 4.1. Die Methodik zur Identifikation der THG-Emissionen

Derzeit existiert für die Feststellung der CO<sub>2</sub>-Emissionen auf Baustellen noch kein standardisiertes Regelwerk. Aus diesem Grund wurde die Methodik zur Identifikation der anfallenden direkten und indirekten Emissionen auf Baustellen in diesem Projekt in Anlehnung an bestehende artverwandte Normen entwickelt. Da es sich bei diesem Projekt nicht um Lebenszyklusbetrachtungen eines Bauwerks oder eines Produkts handelt, sondern um die Standortbetrachtung „Baustelle“, ergeben sich einige spezifische Fragestellungen, die im Folgenden thematisiert werden.

Für die Erstellung von Ökobilanzen (LCAs) und Carbon Footprints stehen internationale Normen, für die Nachhaltigkeit von Bauwerken (Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden und Umweltproduktdeklarationen) europäische Normen zur Verfügung. Diese sind:

- ÖNORM EN ISO 14040:2006: Umweltmanagement — Ökobilanz — Grundsätze und Rahmenbedingungen, Ausgabe: 2009-11-01
- ÖNORM EN ISO 14044:2006 + A1:2018: Umweltmanagement — Ökobilanz — Anforderungen und Anleitungen, Ausgabe: 2018-06-15
- ÖNORM EN ISO 14067:2018 - Greenhouse gases — Carbon footprint of products — Requirements and guidelines for quantification, Ausgabe: 2019-03-15
- ÖNORM EN 15978:2011: Nachhaltigkeit von Bauwerken — Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden — Berechnungsmethode, Ausgabe: 2012-10-01
- ÖNORM EN 15804:2012+A2:2019-10: Nachhaltigkeit von Bauwerken — Umweltproduktdeklarationen — Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte, Ausgabe: 2020-02-15

### 4.1.1. Ziel und Bewertungsgegenstände

Ziel ist es, alle entstehenden THG-Emissionen (direkte & indirekte) auf urbanen Baustellen zu identifizieren, um in weiterer Folge notwendige Rahmenbedingungen sowie Technologien für deren Vermeidung, Verringerung und Verlagerung aufzuzeigen.

Dafür werden folgende vier fiktive urbane Baustellen definiert, der jeweilige IST-Zustand der THG-Emissionen ermittelt und anschließend Szenarien für die Verringerung der THG-Emissionen bis zur „CO<sub>2</sub> neutralen Baustelle“ erstellt:

- Fiktive Baustelle 1 (fB1) – Wiener Wohnbau (Neubau)
- Fiktive Baustelle 2 (fB2) – Thermische Sanierung eines Wohngebäudes
- Fiktive Baustelle 3 (fB3) – Infrastruktur – urbane Asphaltierarbeiten (Neubau)
- Fiktive Baustelle 4 (fB4) – Abriss eines Bürogebäudes

### 4.1.2. Die Definition des Systems

Das System wird über die Systemgrenzen nach außen sowie über die berücksichtigten Prozesse innerhalb des Systems definiert.

Die ÖNORM EN 15978:2011 unterteilt das System „Bauwerk“ in folgende Lebenszyklusphasen:

- Herstellungsphase: Module A1-A3
- Errichtungsphase: Module A4-A5
- Nutzungsphase: Module B1-B7
- Entsorgungsphase: Module C1-C4
- Und zusätzlich ergänzende Informationen außerhalb des Gebäudezyklus: Modul D

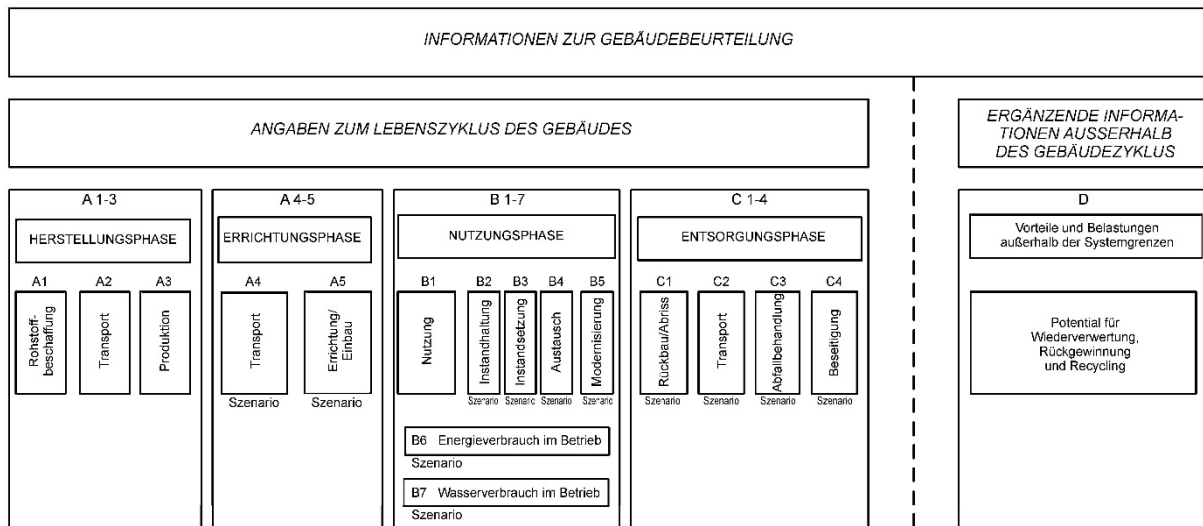


Abbildung 1: Anzeige modularer Informationen für die verschiedenen Lebenszyklusstadien des Gebäudes (EN-15978, 2012, S. 23)

Während bei einer Bauwerksbewertung für ein bestimmtes Bauwerk mehrere bis alle Lebenszyklusphasen betrachtet werden, wird in dieser Arbeit eine Standortanalyse für mehrere fiktive Baustellen durchgeführt. Je nachdem ob es sich um einen Neubau, eine Sanierung oder einen Abbruch handelt, werden unterschiedliche bzw. mehrere Lebenszyklusphasen davon berührt.

### Neubau:

In der ÖNORM EN 15978:2011 (Punkt 7.4.3) werden die Grenzen der Errichtungsphase (Module A4 – Transport und A5 – Errichtung/Einbau) definiert. Die Errichtungsphase umfasst laut dieser Norm die Prozesse für die verschiedenen Bauprodukte ab Werk (Produktionsstätte) bis zur tatsächlichen Fertigstellung des Bauwerks. Nach dieser Definition sind somit Transporte von und zur Baustelle, der Baustelle zuzuordnen (A4). Dabei ist zu beachten, dass neben dem Transport von Materialien und Produkten vom Werk zur Baustelle auch ein eventueller Transport zu Zwischenlagern und deren Weitertransport zur Baustelle zu berücksichtigen ist. Neben dem Transport von Bauprodukten auf die Baustelle ist auch der An- und Abtransport von Baugeräten (Kräne, Rüstmaterialien usw.) in der Berechnung enthalten. Falls Baugeräte aufgrund der Bautätigkeit eines Auftragnehmers häufig von einer Baustelle zur nächsten gebracht werden, wird die durchschnittliche Entfernung in die Betrachtungen einbezogen. Für Mietgeräte sollte die tatsächliche Entfernung für den Transport zum und vom Standort berücksichtigt werden. Der Transport von Personen zum und vom Standort bleibt lt. dieser Norm unberücksichtigt. Hingegen sind alle Auswirkungen und Aspekte in Bezug auf transportbedingte Verluste (d. h. Produktion, Transport und Abfallmanagement der Produkte und

Materialien, die während des Transports beschädigt werden oder auf andere Weise verloren gehen) zu betrachten. (EN-15978, 2012, S. 21 f)

Im Modul A5 wird der eigentliche Bauprozess (Errichtung/Einbau) bilanziert. Die EN 15978 unterteilt das Modul A5 dabei in folgende Prozesse:

- „Erdarbeiten und Freiflächenplanung;
- Lagerung von Produkten, einschließlich Heizung, Kühlung, Luftfeuchteregelung usw.;
- Transport von Materialien, Produkten, Abfall und Gerät innerhalb des Standorts;
- Behelfsarbeiten einschließlich für den Bau benötigten Behelfsarbeiten, die nicht vor Ort stattfinden;
- Produktherstellung und -umwandlung vor Ort;
- Heizung, Kühlung, Belüftung, Luftfeuchteregelung usw. während der Bauphase;
- Einbau der Produkte in das Gebäude einschließlich Zusatzprodukte, die nicht in der EPD der Produkte berücksichtigt sind, z. B. Trennmittel in Schalungen für Beton, bei Abschluss des Projekts zu entsorgende Schalungen;
- Wasserverbrauch für die Kühlung der Baumaschinen oder Reinigung vor Ort;
- Abfallmanagementprozesse anderer auf der Baustelle erzeugter Abfälle. Dazu gehören alle Prozesse (einschließlich Abtransport von der Baustelle) bis zur endgültigen Beseitigung oder bis zum Ende des Abfallstatus;
- Herstellung, Transport und Abfallmanagement von Produkten und Materialien, die während der Einrichtungs- und Einbauphase verloren gehen.“  
(EN-15978, 2012, S. 24)

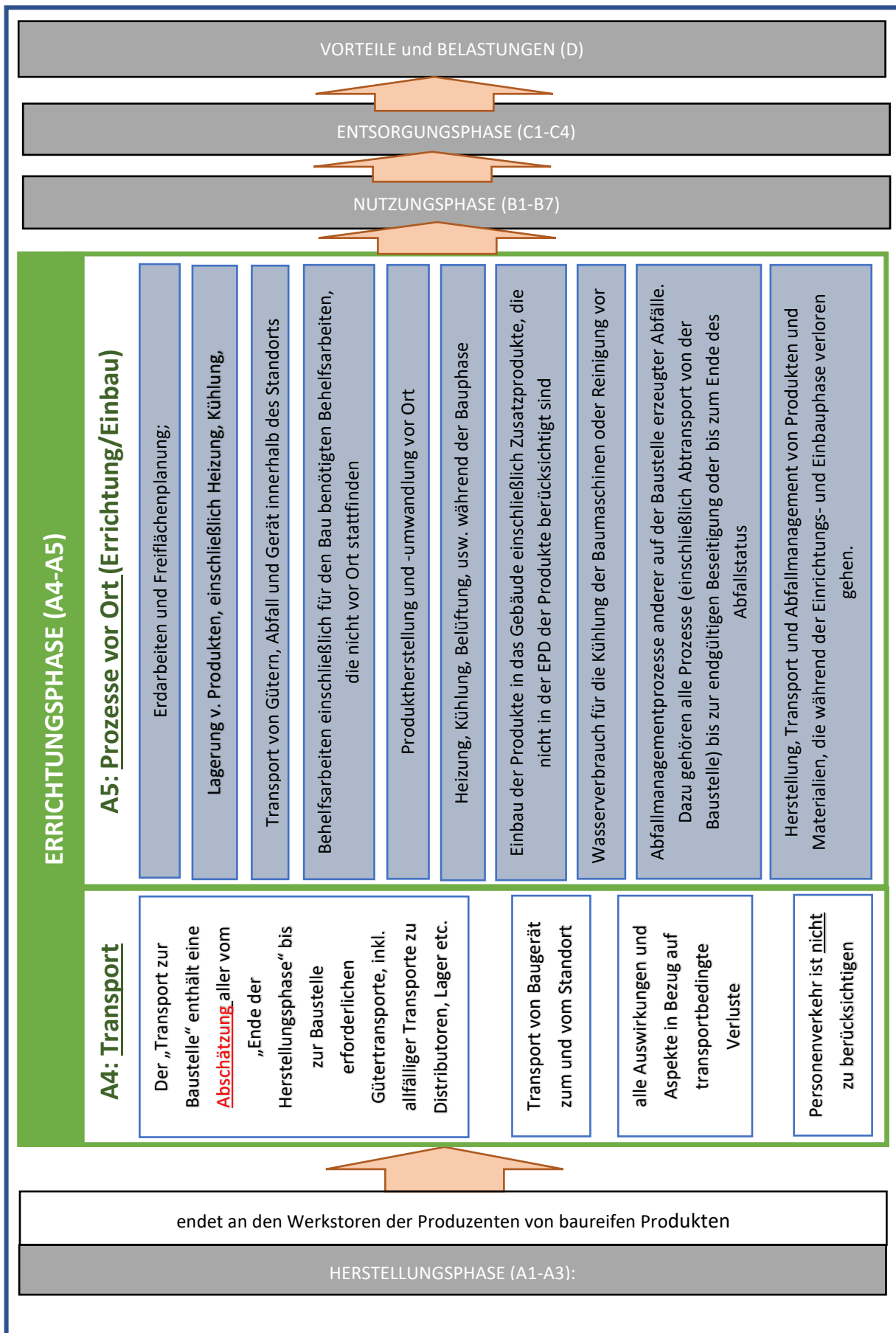


Abbildung 2: System Neubau



### **Sanierung:**

Die Sanierung wird laut ÖNORM EN 15978:2011 dem Modul B5 (Modernisierung) der Nutzungsphase zugeordnet. Dieses Modul umfasst Modernisierungen im Laufe des Lebenszyklus des Gebäudes, die bereits bei der Gebäudebewertung (die meist vor Errichtung erstellt wird) zu erwarten sind. Es wird in der Norm auch festgehalten, dass Modernisierungen, die in früheren Bewertungen nicht berücksichtigt wurden, einer neuen Bewertung unterzogen werden sollen (EN-15978, 2012, S. 26). Ob eine etwaige Modernisierung oder Abbruch dem bestehenden Gebäude zugeordnet oder als Neubau betrachtet wird, muss vom jeweiligen Bilanzierer (Bauherr, Planer) zum Zeitpunkt der Durchführung der Bilanzierung nach den dann gültigen Normen entschieden werden. Auf Basis dieser Entscheidung sind die Prozesse dann den entsprechenden Modulen A4, A5, B5, C1 (Errichtung, Modernisierung, Abriss/Rückbau) zuzuordnen (EN-15978, 2012, S. 26).

### **Rückbau/Abriss:**

Wird ein Gebäude stillgelegt und gibt es keine Pläne für eine zukünftige Nutzung, so beginnt lt. ÖNORM EN 15978:2011 die Lebensend- bzw. Entsorgungsphase. Laut dieser Norm ist Modul C1 definiert als „Die Grenze des Rückbauprozesses schließt sämtliche am Standort stattfindenden Arbeitsgänge sowie alle Arbeitsgänge, die in außerhalb des Grundstücks stehenden temporären Bauwerken stattfinden, mit ein, die für den Rückbau notwendig sind und von der Außerbetriebnahme bis zum Rückbau, zur Zerlegung und/oder zum Abriss durchgeführt werden.“ (EN-15978, 2012, S. 30). Auch die Abgrenzung der Transportaktivitäten wird in der Beschreibung des Moduls C behandelt; „Die Grenze muss alle Auswirkungen umfassen, die sich durch den Transport zur Beseitigung und/oder bis zu dem Punkt, an dem das Ende des Abfallstatus erreicht wird, ergeben (siehe 7.4.5.4). Dies schließt den Transport von und zu möglichen Zwischenlager-/Verarbeitungsstätten mit ein.“ (EN-15978, 2012, S. 31)

### **Kritische Betrachtung der Systemgrenze zwischen Herstellungs- und Errichtungsphase**

Die ÖNORM EN 15978:2011 besagt, dass der „Transport zur Baustelle (A4)“ eine Abschätzung aller vom „Ende der Herstellungsphase“ bis zur Baustelle erforderlichen Gütertransporte, inkl. allfälliger Transporte zu Distributoren, Lager etc. enthält. Je nachdem ob Gewerke baufertige Produkte beziehen oder diese in ihren Firmen noch weiterbearbeiten, sind sie demnach bereits Teil des Moduls A4 oder nicht. Hier einige Beispiele dazu:

Die Gewerke Elektriker und HKLS kaufen meist baureife Güter ein (wie z.B. Kabeln, Steckdosen, Schalter, Sanitärgegenstände, Heizsysteme, Rohre, etc.). In ihren Firmensitzen werden diese meist zwischengelagert, ebenso bei diversen Zwischenhändlern davor. Alle diese Distributoren und Lager sind Teil des Moduls A4, da sie das Bauprodukt selbst nicht verändern bzw. bearbeiten. Die Transportwege können unter Umständen sehr lang sein und können sich kurzfristig je nach Verfügbarkeiten und Preisentwicklungen ändern. Daher sind Transportwege oft nicht einfach bis zum Hersteller (= Beginn von A4) zurückzuverfolgen (Stichwort Globalisierung).

Im Gegensatz dazu kauft der Fensterbauer meist nur Halbfertigzeuge zu (wie z.B. Fensterprofile und Gläser) und stellt in seinem Unternehmen die Fenster in den gewünschten Größen (= baureifes Produkt) her. Die Fensterproduktion ist nicht Teil des Moduls A4, sondern ist lt. Norm dem Modul A3 zuzuordnen. Der für die Errichtungsphase zu berücksichtigende Transportweg ist dementsprechend vom Ort der Fensterproduktion des Fensterbauers bis zur Baustelle.

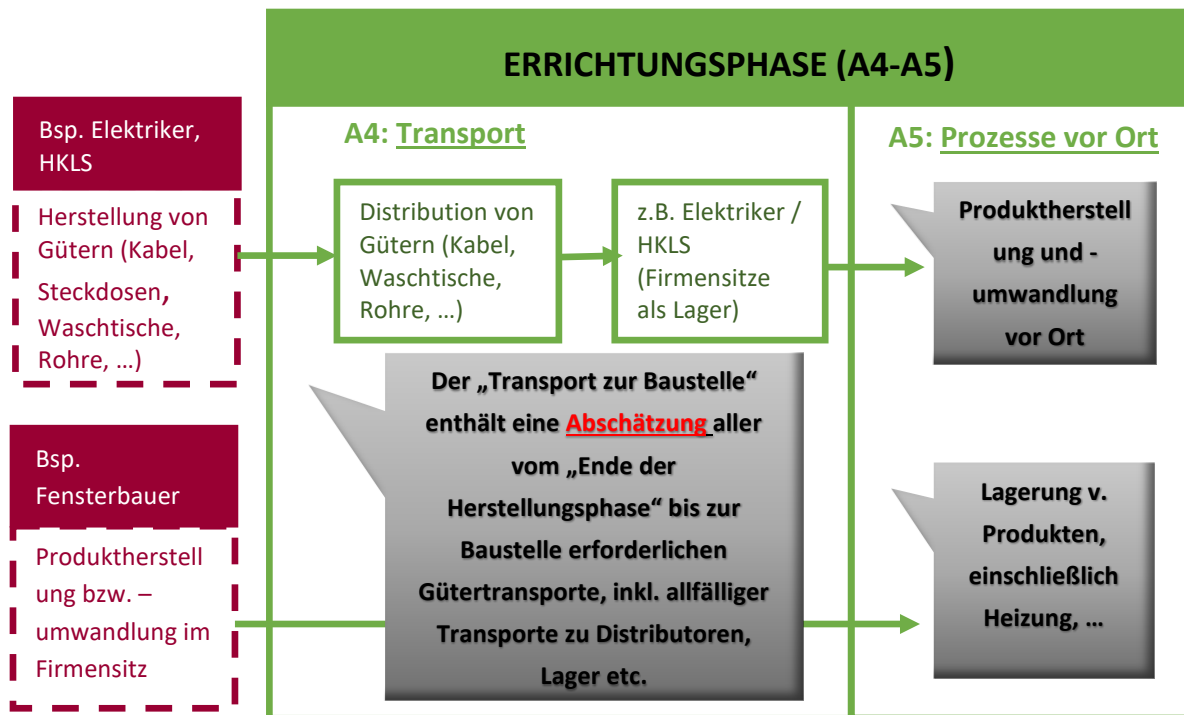


Abbildung 3: Systemgrenze Herstellungs- und Errichtungsphase anhand des Beispiels Elektriker/HKLS und Fensterbauer

Am folgenden Beispiel zeigt sich auch, dass Baustellen mit unterschiedlichem Vorfertigungsgrad nur bedingt vergleichbar sind. Wird Sand, Kies oder Schotter direkt vom Steinbruch zur Baustelle transportiert und dient dort z.B. als Zuschlagstoff für Beton, so ist eben dieser Transportweg (inkl. ev. Zwischenlager) und die Herstellung des Betons auf der Baustelle Teil der Errichtungsphase. Werden die mineralischen Zuschläge jedoch zu einem Betonwerk transportiert und als Fertigbeton auf die Baustelle gebracht, so ist der Transport vom Betonwerk bis zur Baustelle sowie die Einbringung des Fertigbetons zu berücksichtigen. Werden Betonfertigteile verwendet, so findet die Herstellung dieser komplett außerhalb der Errichtungsphase statt und nur der Transport vom Fertigteilwerk zur Baustelle und das Versetzen der Fertigteile ist Teil der Errichtungsphase.

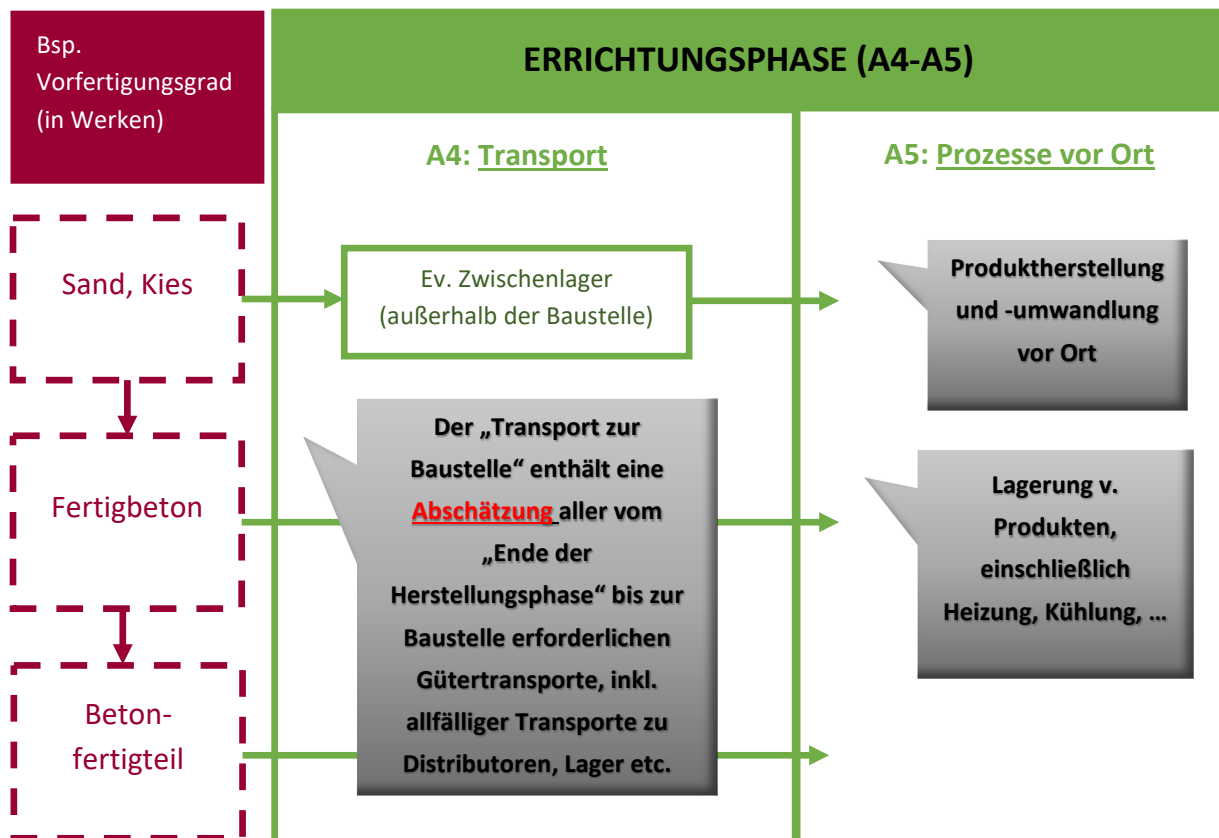


Abbildung 4: Systemgrenze Herstellungs- und Errichtungsphase anhand des Beispiels der Betonherstellung

#### 4.1.3. Direkte, indirekte und diffuse THG-Emissionen

##### Indikatoren zur Beschreibung der Umweltauswirkung

Für die Ermittlung der THG-Emissionen wird der Indikator Treibhauspotential, GWP (Global Warming Potential) in der Einheit kg CO<sub>2</sub>-eq herangezogen.

##### Direkte und indirekte bzw. vor- und nachgelagerte Emissionen

In der 7. Stadt der Zukunft Ausschreibung zur F&E-Dienstleistung 2: „CO<sub>2</sub>-neutrale Baustelle“ wird die Identifikation der anfallenden direkten und indirekten Emissionen auf Baustellen als Leistungsbestandteil angegeben. In den oben genannten Normen wird nicht von direkten und indirekten Emissionen gesprochen. Die ÖNORM EN 15804:2012+A2:2019-10 beschreibt hingegen die Begriffe vor- und nachgelagerte Prozesse wie folgt: „Prozesse, die einer bestimmten Phase im Lebenszyklus vorgelagert (upstream) oder nachgelagert (downstream) sind“ (EN-15804, 2020, S. 13).

Die in der vorliegenden Arbeit verwendeten Quellen für die Wirkungsabschätzung (siehe Punkt 4.3.2) verwenden ebenfalls unterschiedliche Begriffe und die berücksichtigten indirekten Emissionen werden auch unterschiedlich genau beschrieben:

- In der Datenbank „ecoinvent“ wird in den einzelnen Datensätzen zu den Referenzprodukten genau aufgelistet und beschrieben, welche vor- und nachgelagerten Prozesse berücksichtigt werden (Wernet, et al., 2016).
- Auf der Homepage des Umweltbundesamts werden die Begriffe direkte und indirekte Emissionen verwendet und wie folgt beschrieben: „Die unmittelbar am Ort der

Energieumwandlung (z. B. im Kessel) anfallenden Emissionen werden als direkte Emissionen bezeichnet. Bei der Herstellung des Brennstoffes (z. B. Erdölgewinnung und -verarbeitung zu Heizöl) fallen zusätzlich Emissionen an, die hierbei noch nicht berücksichtigt sind. Für die Betrachtung des gesamten Prozesses sind sie ebenfalls relevant. Sie werden als indirekte (oder auch vorgelagerte) Emissionen bezeichnet. Die Gesamtemissionen setzen sich aus den direkten und den indirekten Emissionen zusammen.“ (Umweltbundesamt, 2019)

### **Diffuse Emissionen**

Diffuse Emissionen sind Emissionen, die während der Nutzungsphase von Produkten entstehen. Bei der Be- und Verarbeitung von Baustoffen können schon während der Errichtungsphase diffuse THG-Emissionen emittieren, beispielsweise aus Dämmstoffen (Treibmittel entweichen) sowie Bitumen- oder Farbanstrichen (Lösemittel entweicht). Mittlerweile gibt es für den Hochbau diverse Kriterien, Standards, Förderungen und Gütezeichen (klimaaktiv Gebäudestandard, Österreichisches Umweltzeichen, natureplus, Wohnbauförderungen, etc.) die diese Thematik behandeln.

#### **4.1.4. Ermittlung der THG-Emissionen**

In Anlehnung an die Norm (EN-15978, 2012) wurde ein Berechnungstool entwickelt, welches in vier Bereiche unterteilt wurde. Diese sind:

- Transport,
- Prozesse vor Ort (auf der Baustelle),
- Energieproduktion (Produktion von erneuerbarer Energie auf der Baustelle),
- Zusammenfassung der einzelnen Teilergebnisse.

Das Berechnungstool bietet die Möglichkeit, die Ausgangssituation (IST) und ein Szenario zu erstellen. Dazu können folgende Schritte nebeneinander eingegeben werden (siehe auch Punkt 4.8):

- Ausgangssituation (IST),
- nach Verringerung durch organisatorische Maßnahmen,
- nach Verringerung durch technologische Entwicklungen.

Das Berechnungstool diente zur internen Berechnung der vier fiktiven Baustellen und kann aus Gründen des Datenschutzes nicht für die Allgemeinheit freigegeben werden.

### **Transport**

Im Bereich „Transport“ werden die THG-Emissionen aller Transport-Prozesse (sowohl derer, die lt. Norm dem Modul A4 als auch A5 und C2 zuzuordnen sind) berechnet. Sie werden in Anlehnung an die Norm entsprechend dem Modul A4 unterteilt in die Prozesse:

- Antransport von Baumaterialien und -produkten
- An- und Abtransport von Baugerät (Kräne, Rüstmaterialien usw.)
- Abtransport von Abbruch/Abfällen

Erforderliche Eingabedaten für die Sachbilanz sind:

- Masse des Ladeguts [t]
- Transportdistanz beladen [km]

Für die Wirkungsabschätzung sind zusätzlich folgende Informationen erforderlich

- Transportmittel (z.B. bei LKWs inkl. Gesamtgewicht und Euroklasse)

		Sachbilanz			Ergebnis Sachbilanz		Wirkungsabschätzung				Ergebnis Wirkungsabschätzung
Transportmittel (Bezeichnung, Gesamtgewicht [t])	Ladegut Bezeichnung	Ladegut			Transport-distanz beladen [km]	Tonnen-kilometer [tkm]	LKW Euroklasse	Daten ecoinvent v 3,6 2019			GWP 100 [kg CO2-Eq]
		Volumen [m³]	Dichte [t/m³]	Masse [t]				Datensatz-Name	Einheit	GWP100a/Einheit [kg CO2-Eq]	
<b>Aushub</b>											
LKW 16 - 32 t (Diesel)	Aushub					0	3	transport, freight, lorry 16-32 metric	tkm		0
LKW 16 - 32 t (Diesel)	Aushub Graben					0	4	transport, freight, lorry 16-32 metric	tkm		0
LKW 16 - 32 t (Diesel)											0
<b>Zwischensumme Transportmittel alle LKW</b>				0	0	0					0
<b>Zwischensumme Transport A5</b>				0	0	0					0
<b>Summe der Prozesse "Antransport von Baumaterialien und -produkte (A4)"</b>				39 330	3 075	1 975 371					275 511
<b>Summe der Prozesse "An- und Abtransport von Baugerät (Kräne, Rüstmateri"</b>				1 225	1 205	123 438					12 714
<b>Summe der Prozesse "Abtransport von Abfällen (A5)"</b>				0	0	0					0
<b>Summe LKW</b>				40 555	4 280	2 098 809					288 225
<b>Summe ZUG</b>				0	0	0					0
<b>Summe Schiff</b>				0	0	0					0

Abbildung 5: Ausschnitt aus dem Arbeitsblatt „Transport“ des Excel-Tools - Symbolbild

### Prozesse vor Ort

Im Bereich „Prozesse vor Ort“ werden die THG-Emissionen aller Prozesse auf der Baustelle (sowohl derer, die lt. Norm dem Modul A5 als auch C1 zuzuordnen sind) berechnet. Sie werden in Anlehnung an die Norm entsprechend dem Modul A5 in die Prozesse laut Kapitel 4.1.2 unterteilt.

Erforderliche Eingabedaten für die Sachbilanz sind:

- Einsatzdauer des Baugeräts bzw. Baueinrichtung (z.B. Container) [h]
- Verbrauch pro Einsatzdauer des Baugeräts bzw. Baueinrichtung [l/h], [kWh/h]

Für die Wirkungsabschätzung sind zusätzlich folgende Informationen erforderlich

- Baugerät + Energieträger für dessen Betrieb

0. AUSGANGSSITUATION (IST)											
Eintrag											
Eintrag optional											
Verknüpfung											
Ergebnisse											
		Sachbilanz 0			Ergebnis SB 0			Wirkungsabschätzung			Ergebnis WA 0
Prozesse		Energieträger	Einsatzdauer	Verbrauch/Einsatzdauer	Verbrauch 0			Emissionsfaktor <sup>3</sup>	Einheit des Emissionsfaktors	THG-Emissionen	
Geräte		Aufgabe / Funktion	[Einheit]	[h]	[Einheit/h]	[Einheit]	[MJ] <sup>1</sup>	[kWh] <sup>2</sup>			[kg CO <sub>2</sub> -Eq]
1. Erdbearbeiten u. Freiflächenplanung	Bagger 24t	Erdaushub	Diesel [l]			0	0	0			
	Bagger 35t	Erdaushub	Diesel [l]			0	0	0			
	Bagger 21t	Erdaushub	Diesel [l]			0	0	0			
	Bagger 14t	Erdaushub	Diesel [l]			0	0	0			
	Bagger 9t	Erdaushub	Diesel [l]			0	0	0			
	Bagger 6t	Erdaushub	Diesel [l]			0	0	0			
	Asphaltfertiger	Außenanlagen	Diesel [l]			0	0	0			
	Walze	Außenanlagen	Diesel [l]			0	0	0			
	Rammgerät	Baugrubensicherung	Diesel [l]			0	0	0			
			Zwischensumme Energieträger Diesel, Prozess 1				0	0	0		kg CO <sub>2</sub> -Eq/MJ
Rammgerät	Hydraulikölkühlung	Strom [kWh]				0	0	0			
		Zwischensumme Energieträger Strom, Prozess 1				0	0	0		kg CO <sub>2</sub> -Eq/kWh	0
		Zwischensummen Prozesse 1				0	0	0			0

Abbildung 6: Ausschnitt aus dem Arbeitsblatt „Prozesse vor Ort“ des Excel-Tools - Symbolbild

### Energieproduktion

Der Bereich „Energieproduktion“ ist ein Neben-Kalkulationsblatt für die Erzeugung von erneuerbarem Strom auf der Baustelle. Hier kann die produzierbare Energiemenge mit Hilfe von im Zuge des Projekts erhobenen Stromkennwerten für folgende Anlagen ermittelt werden:

- Photovoltaik-Zelle

- Photovoltaik-Folie
- Kleinwindrad (1 kW)
- Kleinwindrad (5 kW)

Erforderliche Eingabedaten sind:

- Bei den PV-Anlagen die Flächen [m<sup>2</sup>] und die Einsatzdauer [a]
- Bei den Windkraft-Anlagen die Anzahl [Stk.] und die Einsatzdauer [a]

Als Faustregel wird hier angewendet, dass eine Photovoltaikanlage in Mitteleuropa pro Jahr durchschnittlich 1000 kWh Strom pro installiertem kWp erzeugt. Abbildung 7 zeigt einen Ausschnitt (Symbolbild) aus dem Arbeitsblatt „Energieproduktion“ des Excel-Berechnungstools.

Produktion von erneuerbarer Energie auf der Baustelle												
Eintrag												
Eintrag optional												
Verknüpfung												
Ergebnisse												
Strom	Sachbilanz 0						Ergebnis SB		Wirkungsabschätzung			Ergebnis WA
	Strom-kennwerte	Einheit	PV-Fläche [m <sup>2</sup> ]/Windanlagen [Stk.]	Einsatzdauer [a]	Strom-erzeugung [kWh]	Nutzungsgrad [%]	Stromnutzung aus Eigenproduktion		Daten ecoinvent v 3,6 2019			THG-Emissionen
							[MJ]	[kWh]	Datensatz-Name	Einheit	IPCC2013, GWP100a/ Einheit [kg CO2-Eq]	[kg CO <sub>2</sub> -Eq]
PV Zelle	0,225	[kWp/m <sup>2</sup> ]	30	2	13 500	100%	48 600	13 500	electricity production, photovoltaic, 3kWp slanted-roof installation, single-Si, panel, mounted_AT_3.6_Allocation, cut-off	1kWh		0
PV Folie	0,1	[kWp/m <sup>2</sup> ]	1500	1	150 000	100%	540 000	150 000	electricity production, photovoltaic, 3kWp	1kWh		0
Kleinwindrad (1 kW)	1100	[kWh/a]	3	1,5	4 950	100%	17 820	4 950	electricity production, wind, <1MW turbine	1kWh		0
Kleinwindrad (5 kW)	6000	[kWh/a]	1	1,5	9 000	100%	32 400	9 000	electricity production, wind, <1MW turbine	1kWh		0
<b>Summen</b>							<b>638 820</b>	<b>177 450</b>				<b>0</b>

Abbildung 7: Ausschnitt aus dem Arbeitsblatt "Energieproduktion" des Excel-Tools - Symbolbild

### Zusammenfassung der einzelnen Teilergebnisse

Die Auswertung erfolgt nach Prozessen und Modulen entsprechend der Bereiche „Transport“ und „Prozesse vor Ort“ sowie nach Energieträger (Diesel, Strom, etc.). In der Zusammenfassung werden die Ergebnisse der Berechnungen in sechs Schritten zusammengeführt:

- Ausgangssituation (IST)
- nach Verringerung durch organisatorische Maßnahmen
- nach Verringerung durch technologische Entwicklungen
- nach Verringerung durch Erzeugung von erneuerbarer Energie auf der Baustelle
- nach Verringerung durch Zukauf von erneuerbarer (anstelle von nicht erneuerbarer) Energie
- Kompensation

Abbildung 8 zeigt einen Ausschnitt (Symbolbild) aus dem Arbeitsblatt „Zusammenfassung“ des Excel-Berechnungstools.

0. AUSGANGSSITUATION (IST)							
		Ergebnisse Sachbilanz				Ergebnis Wirkungsabschätzung	
Prozess/Energieträger		Energiebedarf pro		Anteile	THG-Emissionen	Anteile	
		[tkm]	[MJ]	[kWh]	[%]	[kg CO2-Eq]	[%]
Transport nach Prozessen	A4.1. Antransport von Baumaterialien und -produkte		-	-			0%
	A4.2. An- und Abtransport von Baugerät (Kräne, Rüstmaterialien usw.) (A4)		-	-			0%
	Abtransport von Abfällen (A5)	0	-	-			0%
Summe Transport (A4+A5)		0				0	0%
<b>Summe Transport A4 (excl. Abtransport von Abfällen)</b>		<b>0</b>				<b>0</b>	<b>0%</b>
Prozesse vor Ort (A5) nach Prozessen	A5.1. Erdarbeiten u. Freiflächenplanung	-				0	0%
	A5.2. Lagerung von Produkten	-				0	0%
	A5.3. Transport innerhalb des Standorts	-					
	A5.4. Behelfsarbeiten + Behelfsarbeiten, die nicht vor Ort stattfinden	-					
	A5.5. Produktherstellung u. -umwandlung vor Ort	-					
	A5.6. Heizung, Kühlung, Belüftung usw. während der Bauphase	-					
	A5.7. Einbau der Produkte in das Gebäude inkl. Zusatzprodukte	-					
	A5.8. Wasserverbrauch für die Kühlung der Baumaschinen oder Reinigung	-				0	0%
	A5.9. Abfallmanagement-prozesse anderer auf der Baustelle erzeugter Abfälle	-				0	0%
	A5.10. Herstellung, Transport u. Abfallmanagement von Produkten u. Materialien die während der Errichtungs - Einbauphase verloren gehen	-	-	-		0	0%
<b>Summe Prozesse A5 inkl. Abtransport von Abfällen</b>		<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>		<b>0</b>	<b>0%</b>
						Kontrolle	0%
Prozesse vor Ort (A5) nach Energieträger	Energieträger Diesel	-					
	Energieträger Strom	-					
	Energieträger ...	-				0	0%
		-				0	0%
		-				0	0%
		-				0	0%
<b>Summe Prozesse A5 excl. Abtransport von Abfällen</b>		<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>		<b>0</b>	
						Kontrolle	0
<b>Summe der Prozesse A4</b>		<b>0</b>				<b>0</b>	<b>0%</b>
<b>Summe der Prozesse A5</b>		<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>		<b>1</b>	<b>100%</b>
<b>Summe A4 + A5 (IST)</b>		<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>		<b>1</b>	<b>100%</b>

Abbildung 8: Ausschnitt aus dem Arbeitsblatt "Zusammenfassung" des Excel-Tools - Symbolbild

## 4.2. Beschreibungen der vier fiktiven Baustellen

Um die Möglichkeiten der THG-Reduktion an Beispielen quantifizieren zu können, wurden fiktive Baustellen im urbanen Bereich definiert. Bei diesen „Musterbaustellen“ handelt es sich um für ihren Baustellentyp übliche Baustellen in einer typischen Größe, wie sie in Wien und anderen Städten häufig zur Ausführung kommen. Für die vier fiktiven Baustellen wurden die Energieverbräuche und die CO<sub>2</sub>-Emissionen dargestellt und dadurch praxisnahe Größenordnungen für Verbräuche bzw. Emissionen geschaffen. Bei den verwendeten Daten handelte es sich Großteils um Daten von realen Baustellen. Datenlücken wurden mit Annahmen oder Literaturdaten aufgefüllt. Auf Basis der vier fiktiven Baustellen wurden die Potentiale der Reduktionsmöglichkeiten durch Energieeinsparung, Verlagerung auf alternative Energieträger oder durch Stromproduktion auf der Baustelle abgeschätzt.

In Ergänzung zu Kapitel 4.1.2, in dem die Systemdefinition erfolgte, sind im Folgenden detailliertere Beschreibungen der Baustellen und Spezifikationen zur Systemdefinition angegeben.

### 4.2.1. Fiktive Baustelle 1 (fB1) – Wiener Wohnbau

Die erste Baustelle stellt einen klassischen Wiener Wohnbau als Neubau in der Nähe des Wienflusses dar. Das Erdgeschoß wird als Geschäftsfläche genutzt, die sieben Obergeschoße beinhalten insgesamt circa 200 Wohnungen mit jeweils einem Balkon oder Loggia. Das Gebäude hat zwei Untergeschoße, die hauptsächlich als Tiefgarage für circa 150 PKW dienen. Zusätzlich gibt es Allgemeinflächen (Verkehrsflächen, Abstellräume, Waschküche, Haustechnik, Müllräume) in üblichem Ausmaß.

Die Baugrube wird bereichsweise durch Spundwände bzw. durch Bohrträger gesichert. Das Gebäude fundiert auf 70 cm dicken Plattenfundamenten aus Stahlbeton. Die Bauweise ist eine Mischform aus Ortbeton-, Halbfertigteil- und Fertigteilbauweise, wobei der Anteil an Fertigteilen in den oberen Geschoßen zunimmt. Der Anteil an Betonfertigteilen liegt circa bei einem Drittel der Betonmenge.

Der Bau erfolgt auf der „grünen Wiese“. Der Beobachtungszeitraum läuft vom Spatenstich bis hin zur schlüsselfertigen Übergabe. Die Bauzeit beträgt zwei Jahre.

#### Daten zum Gebäude:

- Auftragssumme gesamt: ca. 20 Mio. €
- Grundfläche des Gebäudes ca. 2.000 m<sup>2</sup>
- Wohnungsanzahl ca. 200 Wohnungen, 1 Geschäftslokal
- PKW-Stellplätze in Tiefgarage: ca. 150
- Fahrrad-Stellplätze: ca. 300
- Bruttogeschoßfläche: ca. 17.000 m<sup>2</sup>

#### Daten zu den verbauten Massen:

- Bohrträger: ca. 1.750 m
- Spundwand: ca. 5.300 m<sup>2</sup>
- Anzulieferndes Füllmaterial: ca. 5.200 t
- Anzuliefernder Oberboden: ca. 420 t
- Anzuliefernder Sand/Kies/Schotter: ca. 4.000 t
- Frischbeton: ca. 18.200 t
- Bewehrung: ca. 830 t



- Betonfertigteile: ca. 8.600 t (inkl. Bewehrung)
- Estrich: ca. 12.000 m<sup>2</sup>  $\cong$  ca. 1.700 t

#### **Verwendete Geräte vor Ort:**

- Bagger zwischen 6 und 35 Tonnen Gesamtgewicht
- Turmdrehkran 2 Stück
- Autokran 60 t
- Autobetonpumpen
- Estrichtrockner
- Tauchpumpen (zur Wasserhaltung)
- Asphaltfertiger
- Verdichtungswalze
- Rammgerät
- Dieselgeneratoren, Kompressoren, etc.
- Diverse Kleingeräte, Beleuchtung, etc.

#### **Verwendete Transportmittel:**

- LKW zwischen 7,5 und 40 Tonnen Gesamtgewicht
- Betonmischer auf LKW-Fahrgestell
- Pritschen. Etc.

#### **Spezifikationen zur Systemdefinition der Baustelle fB1**

Zu der für den Neubau in Kapitel 4.1.2 definierten Systembeschreibung ist ergänzend anzumerken:

- Betrachtungszeitraum: 24 Monate (von Anfang Mai bis Ende April im übernächsten Jahr)
- Die Prozesse im Zuge des Ausbaus sowie sämtliche Prozesse, die keine großen Erd- oder sonstigen Massenbewegungen zur Folge hatten, wurden nicht in einzelner Form berücksichtigt. Diese gehen jedoch trotzdem als pauschale Stromverbraucher in die Bilanz ein.

#### **4.2.2. Fiktive Baustelle 2 (fB2) – thermische Sanierung eines Wohngebäudes**

Als zweite Baustelle wurde die Renovierung inklusive thermischer Sanierung eines Wiener Wohnbaus gewählt. Ziel dieser Renovierung ist neben einer generellen Renovierung der Wohnungen vor allem die thermische Ertüchtigung des Gebäudes. Das Gebäude besteht aus sieben oberirdischen Geschoßen und ist vollständig unterkellert. Bei dieser Baustelle wurden Abbrucharbeiten, Instandsetzungsarbeiten (insbesondere Fensteraustausch, Bauspenglerarbeiten und Metallbauarbeiten) sowie das Aufbringen zusätzlicher Dämmung (Fassadendämmung und Dachdämmung) durchgeführt. Große dieselbetriebene Baumaschinen kommen bei dieser Baustelle selten zum Einsatz.

#### **Daten zum Gebäude:**

- Fassadenfläche: ca. 5.200 m<sup>2</sup>
- Davon Fensterfläche: ca. 1.200 m<sup>2</sup>
- Grundfläche: ca. 1.600 m<sup>2</sup>
- Bruttogeschoßfläche: ca. 12.000 m<sup>2</sup>
- Abzutransportierendes Abbruchmaterial: ca. 460 t

#### **Verwendete Geräte vor Ort:**

- Bagger 9 Tonnen Gesamtgewicht
- Asphaltfertiger
- Materialaufzug
- Dieselgeneratoren, Kompressoren, etc.
- Diverse Kleingeräte, Beleuchtung, etc.

#### **Verwendete Transportmittel:**

- LKW zwischen 7,5 und 40 Tonnen Gesamtgewicht
- Pritschen. Etc.

#### **Spezifikationen zur Systemdefinition der Baustelle fB2**

Zu der für die Sanierung in Kapitel 4.1.2 definierten Systembeschreibung ist ergänzend anzumerken:

- Da es sich um umfangreiche bauliche Maßnahmen handelt, werden diese hier nicht dem Modul B5 zugeordnet, sondern wie beim Neubau den Modulen A4 und A5 (siehe dazu auch Punkt Sanierung im Kapitel 4.1.2).
- Die Bilanzgrenze wird vom Beginn der Renovierungsarbeiten (ausgeräumte Wohnungen) bis hin zum fertig und einzugsbereit renovierten Wohngebäude gezogen. Der Betrachtungszeitraum betrug damit 22 Monate (Oktober bis Anfang August des übernächsten Jahres)
- Bei den Prozessen vor Ort (Modul A5) waren folgende für die Berechnung relevant:
  - Erdarbeiten und Freiflächenplanung
  - Transporte innerhalb des Standorts
  - Behelfsarbeiten: Beleuchtung
  - Heizung, Kühlung und Belüftung
  - Einbau der Produkte in das Gebäude

#### **4.2.3. Fiktive Baustelle 3 (fB3) – Infrastruktur – urbane Asphaltierarbeiten**

Diese Baustelle stellt die Asphaltierung einer Zubringerstraße für einen Wohnkomplex im urbanen Bereich dar. Der Erdbau inklusive der ungebundenen und gebundenen Tragschichten wurde bei diesem System nicht betrachtet, da keine Daten zur Verfügung gestellt wurden. Für die Straßenoberfläche wird moderner, geräuscharmer Splittmastixasphalt verwendet.

#### **Verwendete Geräte vor Ort:**

- Asphaltfertiger 17 Tonnen Gesamtgewicht 2 Stück
- Verdichtungswalzen 11 Tonnen Gesamtgewicht 2 Stück
- Dieselgeneratoren, Kompressoren, etc.
- Diverse Kleingeräte, Beleuchtung, etc.

#### **Transport:**

- LKW zwischen 7,5 und 40 Tonnen Gesamtgewicht
- Pritschen. Etc.

#### **Daten zur Straße:**

- Zu asphaltierende Fläche: ca. 4.700 m<sup>2</sup>
- Dicke der bituminösen Tragschicht: 6 – 7 cm

- Dicke der bituminösen Deckschicht: 9 – 12 cm
- Gesamtmenge anzulieferndes bituminöses Material: ca. 3.200 t

### **Spezifikationen zur Systemdefinition der Baustelle fB3**

Zu der für die Infrastruktur-Baustelle in Kapitel 4.1.2 definierten Systembeschreibung ist ergänzend anzumerken:

- Betrachtungszeitraum: Die Asphaltoberfläche wurde komplett innerhalb von drei Arbeitstagen im Mai hergestellt.
- Bei den Prozessen vor Ort (Modul A5) waren folgende für die Berechnung relevant:
  - Erdarbeiten und Freiflächenplanung (Verdichtungswalzen, Vorspritzwagen, LKW zur Asphaltbeschickung, Asphaltfertiger)
  - Heizung, Kühlung und Belüftung während der Bauphase (Baucontainer)
  - Einbau der Produkte in das Bauwerk: Handgeführte Walzen, Stromaggregate

#### **4.2.4. Fiktive Baustelle 4 (fB4) – Abriss eines Bürogebäudes**

Diese Baustelle umfasst den Rückbau bzw. Abriss von mehreren Trakten eines Bürogebäudes in einer Kleinstadt nahe Wiens. Beide Trakte sind in Massivbauweise mit Vertikalisolierung und jeweils einmal Satteldach bzw. Flachdach ausgeführt worden. Die Außenwände sind Großteiles aus Stahlbeton, zum Teil aus Ziegelmauerwerk. Der Fassadenaufbau besteht aus Klinkervormauerung, Wärmedämmsystemen und vorgehängten Fassaden. Die Innenwände sind zum Teil aus Stahlbeton, zum Teil aus Ziegelmauerwerk, zum Teil als Leichtbauwände ausgeführt. Die Decken und Stiegen sind aus Stahlbeton. Der Fußbodenaufbau besteht aus Schüttungen, Folien, Estrich, größtenteils als mehrschichtiger Aufbau. Die Fußbodenoberfläche ist zum Teil als Holzboden, zum Teil als Kunststoffboden, zum Teil als Steinzeugfliesenboden ausgeführt. In den Außenbereichen, die zum Teil mit abgerissen werden, sind die Oberflächen aus Asphalt, Klinkerbeläge, Betonplatten, Betonpflaster etc. ausgeführt. Die Fenster sind aus Metall/Holz/Aluminium (gemischt) mit Isolierverglasung. Die Fensterbänke sind aus Blech (außen) bzw. gemischt aus Blech, Steingut und Holz/Holzwerkstoffen (innen). Türen sind als Metalltüren mit Verglasungen, Stahlzargentüren mit beschichteten Holztürblättern, Stahltüren, etc. ausgeführt (gemischt). Weiters sind noch einige Verkleidungen, Vorsatzschalen, Textilien, Glasteile, Glasoberlichten, Kunststoffteile, Verbundwerkstoffe, sowie zwei Trafostationen mit 350 m<sup>3</sup> bzw. 190 m<sup>3</sup> abzurechnen und zu entsorgen.

#### **Die Baustelle gliedert sich in fünf Phasen:**

1. Demontage
2. Störstoffentfrachtung (Phase 1 und 2 sind nicht in der Systembetrachtung der Studie enthalten)
3. Rückbau
4. Verwertung und Entsorgung
5. Wiederverfüllung und Rekultivierung

In Phase 1 und 2 werden stationäre Maschinen, Elektrogeräte, Boden- und Wandbeläge, Abdichtungen, etc. demontiert bzw. ausgeräumt. Phase 3 widmet sich dem Abbruch der eigentlichen Gebäudesubstanz, darunter fallen zum Großteil Asphalt, Beton, Aushubmaterial, Holz, Metalle und Mauerwerk. In Phase 4 „Verwertung und Entsorgung“, werden die Materialien gesammelt, sortiert, getrennt gelagert und entsprechend ihrer Wertigkeit aufbereitet, wiederverwertet, abtransportiert

und gegebenenfalls deponiert. Phase 5 bildet den Abschluss: hier werden noch allfällige Gruben aufgefüllt, das Niveau geebnet und rekultiviert. Großflächige Geländeanschlüßungen mit Abbruch oder Baurestmaterien auf dem Baufeld sind nicht erfolgt.

In der vorliegenden Studie wurden bei der fiktiven Baustelle 4 (fB4) der Abriss bzw. Rückbau behandelt, die vorbereitenden Maßnahmen der Phasen 1 und 2 sind somit außerhalb der Systemgrenzen und in den Ergebnissen nicht enthalten.

#### **Verwendete Geräte vor Ort:**

- Bagger zwischen 6 und 35 Tonnen Gesamtgewicht
- Kleinbagger 7,7 Tonnen Gesamtgewicht
- Minibagger 1,5 Tonnen Gesamtgewicht
- Grader 19 Tonnen Gesamtgewicht
- 2 Brecher mit Siebanlage mit 430 kW bzw. 224 kW

#### **Unterteilung der Prozesse vor Ort:**

- Erdarbeiten und Freiflächenplanung: Grader: Herstellen einer Ebene nach erfolgtem Abriss
- Produktherstellung und -umwandlung vor Ort: Bagger: Abriss des Gebäudes, Verladen des Abbrismaterials auf die Transportfahrzeuge, Verfüllen der Unterkellerungen
- Abfallmanagementprozesse anderer auf der Baustelle erzeugter Abfälle: Betonbrecher/Siebanlage: Aufbereiten des Betonabbruchmaterials für weitere Verwendung

#### **Transport:**

- LKW zwischen 16 und 40 Tonnen Gesamtgewicht
- Vereinzelt LKW 7.5 – 16 Tonnen Gesamtgewicht
- Pritschen. Etc.

#### **Allgemeine Daten zum abzureißenden Gebäude**

- Grundfläche: ca. 5.000 m<sup>2</sup>
- Abzutragende Kubatur gesamt: ca. 60.000 m<sup>3</sup>
- Anzulieferndes Füllmaterial: 1.300 t
- Recycelter Betonabbruch: ca. 3.700 t
- Abzutransportierender Bodenaushub: ca. 1.300 t
- Abzutransportierendes Material gesamt: ca. 8.900 t

#### **Spezifikationen zur Systemdefinition der Baustelle fB4**

Zu der für den Abriss in Kapitel 4.1.2 definierten Systembeschreibung ist ergänzend anzumerken:

- Bei der fiktiven Baustelle 4 (fB4) handelt es sich um einen Abriss bzw. Rückbau. Die betrachtete Baustelle ist daher in der Entsorgungsphase des Bauwerks (Module C1 u. C2) angesiedelt.
- Betrachtungszeitraum: Start des Abbruchs des bereits in Phase 1 und 2 geräumten Gebäudes (Räumen des Gebäudes fällt nicht in den Betrachtungszeitraum!) bis hin zum von Bebauung freigemachten Planum, inklusive Aufbereitung der Abbruchmaterialien für weitere Verwendung (auf anderen Baustellen); 6 Monate (von Anfang April bis Ende September). Der Betrachtungszeitraum entspricht Phase 3 bis 5 der Baustellengliederung.
- Kurztransporte innerhalb der Baustelle wurden berücksichtigt.
- Die Prozesse vor Ort (Modul C1) wurden für die Berechnung in Anlehnung an die Normen unterteilt in:

- Erdarbeiten und Freiflächenplanung
- Produktherstellung u. -umwandlung vor Ort: Abbrucharbeiten der Gebäude
- Abfallmanagementprozesse anderer auf der Baustelle erzeugter Abfälle: Brechen des abgebrochenen Betons

### **4.3. Datenerfassung für die Ermittlung der THG-Emissionen**

Die Datenerfassung der fiktiven Baustellen wurde zu einem großen Teil im Rahmen zweier – zum Zeitpunkt der Fertigstellung der Studie noch nicht abgeschlossener – studentischer Abschlussarbeiten durchgeführt. Herr Maximilian Piatek, BSc. bearbeitete für seine Diplomarbeit die Sachbilanzen der Musterbaustellen 1, 2 und 3, Herr Alexandr Ludanov im Rahmen seiner Bachelorarbeit die Sachbilanz der Musterbaustelle 4. Beide Datenerfassungen wurden in Kooperation und unter Aufsicht des Instituts für Interdisziplinäres Bauprozessmanagement der TU Wien durchgeführt.

Zu den vier Musterbaustellen wurden Daten von den jeweiligen ausführenden Unternehmen in verschiedener Qualität zur Verfügung gestellt. Diese Daten wurden verwendet und, wo Lücken bestanden, wurden diese plausibel aufgefüllt. Genauere Details zu Datenlücken und -unsicherheiten sind in Folge bei den Musterbaustellen genauer erläutert.

#### **4.3.1. Datenquellen und -erfassung für die Sachbilanz**

Die Bautechnischen Einrichtungen, Daten zu Geräten, Transporten, Massen etc. wurden von Aufzeichnungen (Bautagesberichte, Strom- und Diesellabrechnungen, Leistungsverzeichnisse, Gedächtnisprotokolle, Maschineneinsatzpläne, Baustelleneinrichtungspläne, etc.) realer Baustellen entnommen und in Relation zur Größe der fiktiven Musterbaustelle gesetzt. Dadurch besteht einerseits eine Vollständigkeitsgarantie (Top-Down-Ansatz), andererseits wird die Plausibilität der Eingangswerte durch Validierung durch Werte realer Baustellen gestärkt. Datenlücken wurden mit Literatur- und Erfahrungswerten ergänzt. Ergänzungen und Abschätzungen betrafen, mit Ausnahme der Transportdistanzen, im Rahmen dieser Studie ausschließlich Prozesse, die einen sehr geringen Anteil an den Gesamt-Emissionen hatten. In der vorliegenden Studie konnten die Transportentfernungen nicht in allen Fällen bis zum Herstellungsort der Bauprodukte zurückverfolgt werden.

#### **Fiktive Baustelle 1 (fB1) - Wiener Wohnbau**

Die Daten für die fiktive Baustelle 1 entstammen einem realen Bauprojekt, das 2019 in Wien fertiggestellt wurde. Werte für verbaute, bewegte und abtransportierte Massen wurden dem Leistungsverzeichnis entnommen. Bei Kubikmeterangaben wurden realistische Annahmen für die Dichte getroffen (etwa abzutransportierender Bodenaushub). Transportdistanzen wurden aufgrund von Zulieferern / Deponiestätten in der Umgebung ausgewählt. Hier wurde realitätsnah jeweils die kostengünstigste Variante gewählt. Die Größe der Transportfahrzeuge war nicht bekannt, hierfür wurden plausible und ökonomisch sinnvolle Annahmen für Fahrzeuggröße getroffen.

Da Daten für Baumaschinen der Größe nach vorhanden waren, wurden diese gewichtsmäßig im Transport berücksichtigt. Der Diesel- bzw. Stromverbrauch der Geräte wurde über eine Abschätzung der Leistung, der Einsatzdauer (Datenlage gut) sowie einem typischen Verbrauch pro kWh berechnet.

Daten zu Kleingeräten (Winkelschleifer, Schremmhämmer, ...) waren keine vorhanden, hier mussten Annahmen getroffen werden. Hilfreich hierbei war, dass Daten zu monatlichem Strom- und Dieserverbrauch (auf der Baustelle für Baumaschinen, nicht für den Transport) vorhanden waren. Hierdurch fiel die Zuteilung auf die Geräte, Maschinen sowie die Bauheizung einfacher aus und es war eine Plausibilitätskontrolle vorhanden.

Der Stromverbrauch auf der Baustelle ist bekannt, es wurden die Kosten für die großen Einzelverbraucher (Kran, Baucontainer, Heizung, Estrichrockner) herausgerechnet und der Rest den Kleingeräten zugewiesen.

Die Transportdistanzen wurden anhand der Standorte von Zulieferern rund um Wien abgeschätzt. Diese Daten sind keine realen Transportdaten, sondern beruhen auf Annahmen. Es wurden nicht unbedingt die nächstgelegenen Zulieferer herangezogen. Bei der Abschätzung wurde darauf geachtet, dass die gesamten Tonnenkilometer in etwa den Benchmarkwerten des Demonstrationsprojektes RUMBA entsprechen (Romm & Korab, 2007).

### **Fiktive Baustelle 2 (fB2) – thermische Sanierung eines Wohngebäudes**

Auch die Fiktive Baustelle 2 beruht auf einem realisierten Projekt in Wien. Wie bereits im Kapitel 4.2.2 beschrieben, wurde ein Wiener Wohnbau thermisch saniert und renoviert. Werte für verbaute, bewegte und abtransportierte Massen wurden auch hier dem Leistungsverzeichnis entnommen. Transportdistanzen wurden aufgrund von Zulieferern / Deponiestätten in der Umgebung ausgewählt. Hier wurde realitätsnah jeweils die kostengünstigste Variante gewählt. Die Größe der Transportfahrzeuge war nicht bekannt, hier wurden Annahmen getroffen. Daten zu Baugeräten- und Maschinen waren nur sehr begrenzt vorhanden, es war nur bekannt, dass ein Autokran und ein Materialaufzug vorhanden waren. Dementsprechend wurden Geräte aufgrund baupraktischer Überlegungen gewählt. Detaillierte Daten zu Strom- oder Dieserverbrauch waren nicht zur direkten Verwendung vorhanden, sondern mussten hergeleitet werden. Daten zu Transportdistanzen wurden auf gleiche Weise wie bei der fiktiven Baustelle 3 abgeschätzt.

### **Fiktive Baustelle 3 (fB3) – Infrastruktur – urbane Asphaltierarbeiten**

Die fiktive Baustelle 3 beruht auf einem realen Straßenbauprojekt im Rahmen eines größeren Bauprojektes in Wien, aus dem der Straßenbau extrahiert wurde. Werte für verbaute, bewegte und abtransportierte Massen wurden auch hier dem Leistungsverzeichnis entnommen. Die Datenlage zu verwendeten Geräten, deren Einsatzdauer und Leistung ist sehr gut, sodass hier keine Annahmen getroffen werden mussten. Dasselbe gilt für verwendete Transportfahrzeuge und -distanzen, hierzu war eine gute Datenlage vorhanden. Detaillierte Daten zu Strom- oder Dieserverbrauch waren hingegen nicht bekannt. Auch die Daten zum Unterbau konnten im Zuge der Bearbeitung des vorliegenden Projektes nicht mehr zeitgerecht geliefert und damit auch nicht verwendet werden.

### **Fiktive Baustelle 4 (fB4) – Abriss eines Bürogebäudes**

Fiktive Baustelle 4 war die datenmäßig am besten abgedeckte Baustelle. Es waren genaue Daten zu Maschinen, Geräten, deren Einsatzdauer, Transporten (nach Abfallart aufgeschlüsselt) sowie Transportdistanzen vorhanden. Auch bewegte Massen konnten einem Leistungsverzeichnis entnommen werden. Für die Verbräuche von Maschinen und Geräte mussten Annahmen getroffen werden: detaillierte Daten zu Strom- oder Dieserverbrauch waren nicht bekannt.

### 4.3.2. Datenquellen und -erfassung für die Wirkungsabschätzung

Für die Berechnung der Wirkungsabschätzungen der IST-Ausgangssituation wurden bei dieser Arbeit die kostenpflichtige generische Datenbank ecoinvent Datenbank, Version 3.6 (2019) herangezogen. Als Umweltwirkungskategorie wird der Klimawandel gesamt, Indikator Treibhauspotenzial insgesamt (GWP-gesamt) nach Basis-Modell von 100 Jahren des IPCC (Weltklimarat), beruhend auf IPCC 2013, Einheit kg CO<sub>2</sub>-eq. verwendet (GWP 100a). Das System-Modell ist „Allocation, cut-off by classification“. (Wernet, et al., 2016)

Für die Ermittlung der Szenarien wurden zusätzlich Daten vom Umweltbundesamt: „Berechnung von Treibhausgas (THG)-Emissionen verschiedener Energieträger“, Datenstand: Oktober 2019, aktualisiert Jänner 2020 (Umweltbundesamt, 2019), THG-Emissionen gesamt in CO<sub>2</sub>-Äquivalent inkl. Vorkette (= direkte + indirekte Emissionen) verwendet (Umweltbundesamt, 2019).

#### Datenqualität bzw. Datenunsicherheiten

Je nach verwendeten Datenbanken und Literaturquellen sind die Emissionsfaktoren für Treibhausgaspotenzial unterschiedlich. Beispielsweise führen die Datensätze für Diesel-betriebene Baumaschinen je nach Quelle zu unterschiedlichen Ergebnissen. Da sich die Emissionsfaktoren auf unterschiedliche Einheiten beziehen können (z.B. auf Einsatzstunden der Baumaschinen oder auf Verbrauch der Baumaschinen in Liter Diesel oder MJ, etc.), können die Abweichungen sowohl in der Sachbilanz als auch in der Wirkungsabschätzung liegen. In diesem Projekt wurden nachfolgend beschriebene Datensätze verwendet.

#### Verwendete Datensätze für die Wirkungsabschätzung

##### Transportprozesse:

- LKW: In ecoinvent stehen Datensätze für mehrere Euroklassen und Gewichtsklassen zur Verfügung. Die Datensätze repräsentieren das Service eines Tonnenkilometers [ton\*km] Gütertransports und beziehen sich auf den gesamten Transportlebenszyklus, d.h. auf den Bau, den Betrieb, die Wartung und das Ende der Lebensdauer von Fahrzeug- und Straßeninfrastrukturen. Treibstoffverbrauch und Emissionen beziehen sich auf durchschnittliche europäische Fahrten und Beladungsfaktoren. Leerfahrten sind dadurch berücksichtigt. (Wernet, et al., 2016)

##### Prozesse vor Ort – energetische Prozesse

- Energieträger Strom: Treyer, K., market for electricity, medium voltage, AT, Allocation, cut-off by classification, ecoinvent database 3.6; Einheit kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh. (Wernet, et al., 2016)
- Energieträger Diesel: Menard, J.-F., propane, burned in building machine, GLO, Allocation, cut-off by classification, ecoinvent database 3.6; Einheit kg CO<sub>2</sub>-eq/MJ. (Wernet, et al., 2016)

##### Zusätzlich für die Szenarien

- Stromaufbringung auf der Baustelle aus der ecoinvent Datenbank 3.6 (2019):
  - Treyer, K., electricity production, photovoltaic, 3kWp slanted-roof installation, single-Si, panel, mounted, AT, Allocation, cut-off by classification, ecoinvent database 3.6; Einheit kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh. (Wernet, et al., 2016)
  - Treyer, K., electricity production, photovoltaic, 3kWp slanted-roof installation, multi-Si, panel, mounted, AT, Allocation, cut-off by classification, ecoinvent database 3.6; Einheit kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh. (Wernet, et al., 2016)

- Treyer, K., electricity production, wind, <1MW turbine, onshore, AT, Allocation, cut-off by classification, ecoinvent database 3.6; Einheit kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh. (Wernet, et al., 2016)
- UZ46 – Grüner Strom (Umweltbundesamt, 2019). Siehe dazu auch Punkte 4.7.5.

## **4.4. Methodik zur volkswirtschaftlichen, betrieblichen und Investitions-Kostenabschätzung**

### **4.4.1. Methodik zur betrieblichen Investitionskostenabschätzung**

Um die Investitionen der einzelnen Maßnahmen miteinander vergleichbar und abschätzbar zu machen, wird im Folgenden Kapitel eine Berechnungsmethode vorgestellt, die zur Investitionskostenanalyse verwendet wird.

Die Kostenanalyse erfolgt in einem Flussdiagramm, das als Handlungsempfehlung zu Investitionen zur Aufbesserung der CO<sub>2</sub>-Bilanz verstanden werden kann. Die einzelnen Maßnahmen werden nach ihrer Rentabilität kategorisiert und anhand ihres Kosten-/Nutzen-Verhältnisses gereiht. Dabei werden den einzelnen Investitionen jeweilige Abschreibungszeiträume zugewiesen und auf Basis dessen das Kosten/Nutzen-Verhältnis in € pro eingespartem kg CO<sub>2</sub> berechnet. Der Vorteil dieser Vorgehensweise liegt darin, dass große und kleine Investitionen problemlos anhand ihrer Kosten/Nutzen-Effektivität miteinander verglichen werden können.

In der 1. Kategorie stehen Investitionen, die innerhalb des jeweils gewählten Abschreibungszeitraums einen betriebswirtschaftlichen Nutzen erbringen. In der 2. Kategorie werden Investitionen gereiht, die ungefähr investitions-neutral oder sehr günstig sind. In der 3. Kategorie stehen Investitionen, die nach dem Abschreibungszeitraum noch immer nicht amortisiert sind und somit dem Investor einen wirtschaftlichen Nachteil verschaffen. In die 4. Kategorie fallen Investitionen, deren laufende Kosten ihren laufenden Nutzen überschreiten und die somit zu einer eigenen Kostenstelle werden. Diese Art von Investitionen betrifft somit aus einem wirtschaftlichen Standpunkt die ungünstigsten Maßnahmen.



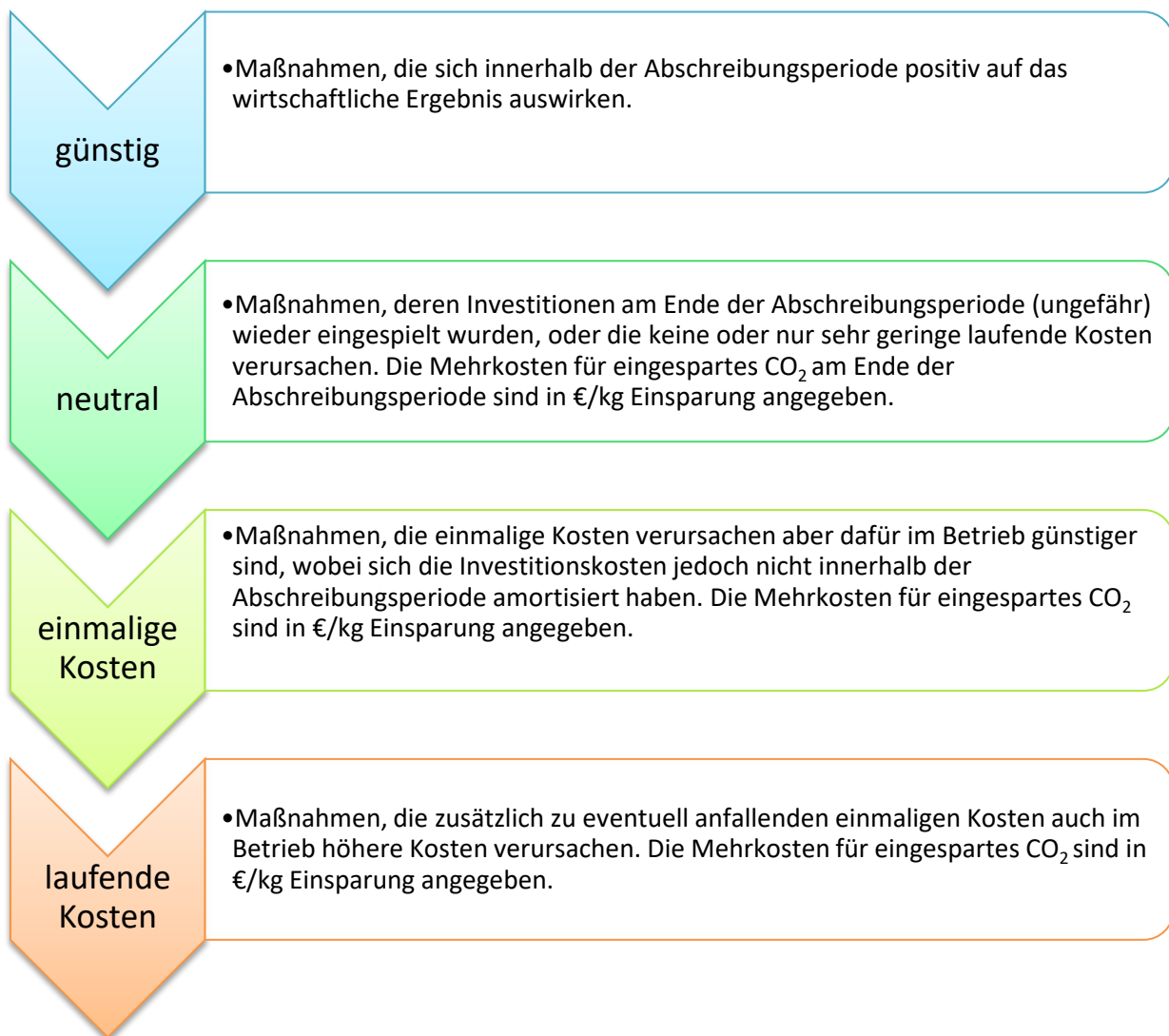


Abbildung 9: Methodik des Flussdiagramms zur Investitionskostenabschätzung

Das Diagramm liest sich als Handlungsempfehlung von oben nach unten. Ist ein fixes Budget zur Verbesserung der CO<sub>2</sub>-Bilanz vorhanden, so sind die Maßnahmen von oben nach unten der Reihe nach abzarbeiten, um einen maximalen Nutzen (CO<sub>2</sub>-Ersparnis) für jeden eingesetzten Euro zu erzielen.

#### 4.4.2. Methodik zur volkswirtschaftlichen Investitionskostenabschätzung

Die Kosten der einzelnen Maßnahmen werden mit möglichen Strafzahlungen bei Verfehlen der Klimaziele der Europäischen Union entgegengestellt. Sekundäre Auswirkungen des Klimawandels auf die Volkswirtschaft bleiben bei dieser Methode unberücksichtigt.

## 4.5. Datenerfassung für die Investitions-Kostenabschätzung

### 4.5.1. PV-Anlagen

Die Anschaffungs-, Wartungs- und Nebenkosten für Photovoltaikzellen und -Folien werden gemäß Tabelle 10 in Kapitel 4.7.4 veranschlagt. Für die Länge der Verkabelung wird 1 Meter Kabel pro m<sup>2</sup> Folie/Zelle angenommen. Dieser Wert kann stark variieren, die niedrigen Kosten für Kabel haben jedoch keinen starken Einfluss auf das Ergebnis.

Es wird mit einem jährlichen Ertrag von 1.000 kWh/Wp gerechnet (Photovoltaic Austria). Es besteht die Annahme, dass der Strom ganzjährig, auch am Wochenende genutzt werden kann (zum Beispiel zur Aufladung elektrischer Baumaschinen). Für den kalkulatorischen Zinssatz für die Investitionskosten wird der übliche Wert von 5,0 % angenommen.

### 4.5.2. Kleinwindkraftanlagen

Entscheidend für den Erfolg des Einsatzes von Windkraft sind die Volllaststunden pro Jahr. Diese betragen in Österreich zwischen 900 und 2.500. Es wird davon ausgegangen, dass Kleinwindkraftwerke nur in gut oder mittel gut bewehrten Lagen zum Einsatz kommen, daher wird der Mittelwert für das mittlere Drittel herangezogen: Dieser beträgt 2.105 h/a, was einem Vollwindfaktor von 0,24 entspricht (Energie-Control Austria, 2016).

Die Kosten für die Montage von Kleinwindkraftanlagen werden wie folgt geschätzt: es wird ein LKW inklusive Fahrer:in für drei Stunden gebunden. Die Montage am Kran erfolgt durch zwei Arbeiter:innen und dauert eine Stunde. Dabei entstehen zusätzliche Kosten für Kleinteile und anteilige Gerätekosten von 30 €. Die LKW-Stunde inklusive Fahrer:in wird mit 140 €, die Mittellohnenkosten für die Montage mit 35 € geschätzt. Somit ergeben sich die Montagekosten zu  $140 \cdot 3 + 35 \cdot 2 + 30 = 520$  zu 520 €. Einmal pro Jahr muss die Montage in diesem Beispiel aus Gründen der Wartung an der Windanlage am Kranausleger bzw. dessen Wechsel neu erfolgen. Die Anschaffungskosten für Kleinwindkraftanlagen sowie sonstige Betriebskosten der Anlage (Wartung, ...) werden gemäß Tabelle 11 in Kapitel 4.7.4 veranschlagt. Für den kalkulatorischen Zinssatz für die Investitionskosten wird der übliche Wert von 5,0 % angenommen.

### 4.5.3. Hybride Baumaschinen

Die Investitionskosten hybrider Baumaschinen wurden mit +20 % gegenüber rein dieselbetriebenen Maschinen beaufschlagt (Hauptverband der Deutschen Bauindustrie E.V., Fachverbände der Bauindustrie Österreich, 2020). Der Dieserverbrauch wurde um 20 % niedriger angesetzt.

### 4.5.4. Elektrische Baumaschinen

Zur Abschätzung der Mehrkosten bei der Anschaffung von elektrischen Baugeräten wurden bei mehreren in Österreich tätigen Herstellern Anfragen an Datenblätter und Listenpreise von elektrisch betriebenen Baumaschinen gestellt. Diese wurden dann mit Listenpreisen der BGL 2020 von vergleichbaren Dieselmotoren verglichen, um eine Vorstellung des Größenverhältnisses der Mehrkosten durch Elektrifizierung zu erhalten. Etwaige Unterschiede in den Rabattierungen sind bei

dieser Methode nicht inbegriffen, da hier lediglich Listenpreise aus der Baugeräteliste 2020 (Valorisierung: Baupreisindex für Tiefbau 1. Quartal 2021 = 100,9 (statistik.at)) und nicht tatsächliche Verkaufspreise miteinander verglichen wurden.

Für die in Tabelle 1 angeführten Baumaschinen wurden Listenpreise angefragt und mit vergleichbaren Maschinen der BGL verglichen.

Tabelle 1: Preise für E-Baugeräte im Vergleich zu jeweiligem fossil-betriebenen Pendant

Gerät / (Dauer-)Leistung	Preis Dieselgerät lt. BGL	Preis Elektro- gerät lt. Hersteller	Mehrosten Elektro zu Diesel in %
E-Miniraupenbagger Nettoleistung 7 kW	23.800 €	57.500 €	+142 %
E-Miniraupenbagger NL 15 kW	41.850 €	110.000 €	+ 163 %
E-Miniraupenbagger NL 17 kW		**	+107 %
E-Umschlagbagger 90 kW	226.750 €	525.000 €	+125% ... +138 %
E-Kompakt-Radlader 17 kW	37.200 €	102.500 €	+175 %
E-Radlader 15 kW, 1,5 t NL		**	+19 %
Raddumper 9 kW, 1,5 t Nutzlast		**	+78 %
Kettendumper 5 kW, 1,5 t NL		**	+119 %
Kettendozer 160 kW	380.400 €	610.000 €	+60 %
Verdichtungsstampfer verschiedene Größen		**	-12 % ... +2 %
Vorwärtslaufende Vibrationsplatten		**	+21 % ... +36 %
Elektrisches Großbohrgerät		**	Werte sind den Studienautor:innen bekannt
<b>Elektrische Baumaschinen allgemein:</b>		**	+20 % ... +25 % (lt. Hersteller)

\*\* keine Listenpreise vorhanden, nur Prozentangaben zum Mehrpreis gem. Angaben von Herstellerfirmen

Die Reparaturkosten von elektrischen Baugeräten wurden um 30 % geringer als jene von Dieselbaugeräten angesetzt. Diese vorsichtige Annahme beruht auf Erfahrungswerten von Elektro-PKWs, die um ca. 35 % niedrigere Wartungskosten aufweisen als vergleichbare Modelle mit Verbrennungsmotor (Khom, 2021) (Ely, 2021). Ein weiterer Unterschied bei den Kosten im Betrieb ist der Wegfall von Schmierstoffen von elektronischen Baumaschinen.

Bei den Preisen für Strom, Diesel und Schmiermittel wurde das Preisniveau von 2019, also von vor der Corona-Pandemie herangezogen, damit dieser Peak das Ergebnis nicht übermäßig beeinflusst. Es wurde jeweils ein Szenario mit unveränderlichen und veränderlichen Strom- und Dieselpreisen gerechnet. Der Unterschied der beiden Szenarien war marginal (im Zehntel-Prozent-Bereich), es ist jedoch anzumerken, dass der Preis für Elektrizität in den letzten Jahrzehnten schneller angestiegen ist (im Durchschnitt ca. +3 % / Jahr (statista.at, 2020)) als jener für Diesel (ca. +2 % / Jahr (statista.at, 2020)), wobei bei der Berechnung des Anstiegs von Strom und Diesel wieder die Corona-Jahre 2020 und 2021 ausgeklammert wurden). Das ist nicht unbedingt ein Trend, der in Zukunft erwartet wird, vor allem mit der imminanten Möglichkeit einer CO<sub>2</sub>-Steuer. Für den kalkulatorischen Zinssatz für die Investitionskosten wird der übliche Wert von 5,0 % angenommen.

#### **4.5.5. Wasserstoffbetriebene Baumaschinen**

Wasserstoffbetriebene Baumaschinen sind derzeit noch nicht am Markt, es sind daher keinerlei Preise für Wasserstoffmaschinen verfügbar. Daher wird der aus der Automobilindustrie abgeleitete Faktor 2 gegenüber Dieselmotoren verwendet. Die Kosten für Wasserstoff betragen ca. 9 €/kg, die Energiedichte ist mit 33,33 kWh/kg ca. drei Mal so hoch wie von Diesel. Der Wirkungsgrad von Brennstoffzellenmotoren (ca. 35 %) ist etwas niedriger als der von Dieselmotoren.

#### **4.5.6. Betrieb von Baumaschinen mit E-Fuels**

Die Energiedichte von Oxymethylenether (OME<sub>x</sub>) beträgt ca. 42 MJ/kg (Diesel: 42,8), er besitzt jedoch eine höhere Dichte (1067 kg/m<sup>3</sup>, Diesel: 838 kg/m<sup>3</sup>), wodurch sich eine rund 25 % höhere Effizienz pro Liter ergibt (Härtl, Gaukel, Pélerin, & Wachtmeister, 2017) (Benajes, Garcíá, Monsalve-Serrano, & Martínez-Boggio, 2020). Der Preis für E-Fuels beträgt derzeit ca. 4,50 € pro Liter (Berninghausen, 2019).

Die Umbaukosten für Motoren auf den Betrieb mit E-Fuels wurden pauschal mit 1.000 € beanschlagt (Schätzwert).

#### **4.5.7. Strafzahlungen für verfehlte Klimaziele**

Die Kosten für die Überschreitung der Klimaschutzziele der EU betragen laut österreichischem Rechnungshof zwischen 50 und 100 € pro Tonne CO<sub>2</sub> (Rechnungshof Österreich, 2021), das entspricht 5 bis 10 Cent pro kg CO<sub>2</sub>.

### **4.6. Methodik der Expert:innenumfrage**

Um die Meinungen der Bau- und Energiebranche auszuloten und den aktuellen Stand der Technik zu für die Studien relevanten Themen abzufragen, wurde von Jänner bis April 2021 eine Online-Umfrage zu den Themenfeldern Baustrom, Kraftstoffverbrauch auf Baustellen, Baustellentransporte, Energieproduktion auf Baustellen, CO<sub>2</sub>-Kompensation und CO<sub>2</sub>-Einsparmöglichkeiten auf Baustellen durchgeführt. Im Rahmen der Umfrage wurden 149 Expertinnen und Experten aus Bauunternehmen (73), als Bauträger auftretende Personen (42), Planungsbüros (21) und anderen Unternehmen (Baugerätehersteller:innen, Transportunternehmer:innen, Vertreter:innen der Energiebranche, F&E-Dienstleister:innen der Branchen, etc.) befragt. Die meisten von ihnen sind schon über 15 Jahre in der Branche tätig (96), fast alle haben die höhere Reife (136), die meisten davon auch einen Hochschulabschluss (103). Bei den Befragten Personen handelt es sich um ausgewählte Kontakte des IBMP sowie der RMA. Es ist daher auszuschließen, dass der Fragebogen von Personen außerhalb der Bau- oder Energiebranche ausgefüllt wurde.

Die Umfrage wurde über Microsoft Forms durchgeführt und beinhaltet geschlossene sowie offene Fragen gleichermaßen. Bei der Umfrage wurden die Verzweigungsfunktionen von Microsoft Forms genutzt. Dadurch wird sichergestellt, dass von den Teilnehmer:innen keine Fragen beantwortet werden mussten, zu denen sie keine Expertise besaßen. Zum Beispiel startet jedes Kapitel mit der Frage „Haben Sie Erfahrung mit ...?“ und den Auswahlmöglichkeiten „Ja“ und „Nein“. Nur bei der Auswahl von „Ja“ öffnen sich die Fragen des jeweiligen Kapitels, bei „Nein“ wird der oder die

Befragte zum nächsten Kapitel weitergeleitet, das wiederum mit der Frage nach vorhandener Erfahrung startet. Vor offenen Fragen wurden die Teilnehmer:innen zuerst stets gefragt, ob ihnen etwas relevantes zum jeweiligen Fragethema einfällt. Nur bei der Auswahl von „Ja“ erschien die offene Frage, bei „Nein“ wurde zur nächsten Frage weitergeleitet.

Geschlossene Fragen, die die Meinung der Expertin oder des Experten abfragen, wurden mit der Methode der Likert-Skala durchgeführt. Dabei wurden stets fünf Antwortmöglichkeiten zur Auswahl gestellt. Diese reichten von „stimme überhaupt nicht zu“ bis „Stimme voll und ganz zu“, von „nie“ bis „immer“ oder vergleichbare Auswahlmöglichkeiten, jeweils sinngemäß an die Art der Fragestellung angepasst. Geschlossene Fragen wurden (im Gegensatz zu offenen Fragen) als „erforderlich“ markiert, das heißt, dass die „Weiter“-Funktion ausgegraut wurde, wenn keine Auswahl getroffen wurde.

19

Werden bereits alternative Kraftstoffe auf Baustellen verwendet? \*

	nie	selten	gelegentlich	oft	immer
Biodiesel	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Wasserstoff	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Erdgas	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Hybride	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Abbildung 10: Beispiel für Fragestellung mithilfe der Likert-Skala. Der rote Asterisk markiert, dass es sich um eine Pflichtfrage handelt.

Weiters wurden im Zuge des Workshops am 28. April 2021 die Teilnehmer:innen mittels einer live durchgeführten Umfrage zu ihrer Einschätzung des Verringerungspotentials durch organisatorische und auch technologische Maßnahmen bis 2023 befragt. Es wurde dafür die online-Plattform „Menti“ verwendet. Die Expert:innen bewerteten die Einsparpotentiale verschiedener Prozessgruppen auf einer Skala von 0 % (keine Einsparungen möglich) bis 100 % (Emissionen können zur Gänze eingespart werden). Die Ergebnisse befinden sich ebenfalls in Kapitel 5.4.

## 4.7. CO<sub>2</sub>-Einsparpotenziale auf Baustellen

Um umfangreiche Einsparungen von THG-Emissionen erzielen zu können, bedarf es einer Reihe von Schritten, die untereinander verknüpft sind. Im Folgenden sprechen wir von **Verringerung** der THG-Emissionen, diese werden erreicht durch **Vermeidung** von (Energie)-Bedarf und -Verbrauch einerseits und durch **Verlagerung** der (Energie)-Aufbringung von nicht erneuerbarer Energie auf erneuerbare Energie andererseits. Abbildung 12 stellt diese Zusammenhänge grafisch dar.

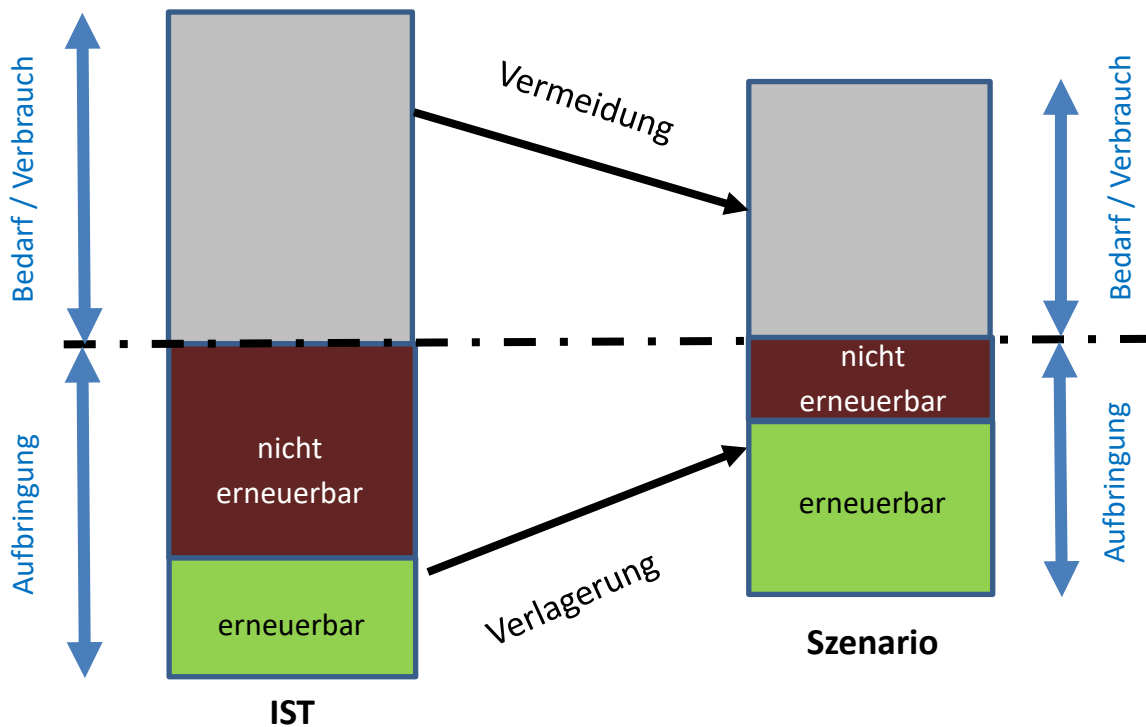


Abbildung 11: Verringerung von THG-Emissionen durch Vermeidung und Verlagerung

Die Schritte zur Verringerung der THG-Emissionen werden für diese Arbeit in einem Stufenplan wie folgt definiert (siehe dazu auch Abbildung 13):

1. Verringerung durch organisatorische Maßnahmen
2. Verringerung durch technologische Entwicklungen
3. Verringerung durch Erzeugung von erneuerbarer Energie auf der Baustelle
4. Verringerung durch Zukauf von erneuerbarer (anstelle von nicht erneuerbarer) Energie
5. Kompensation

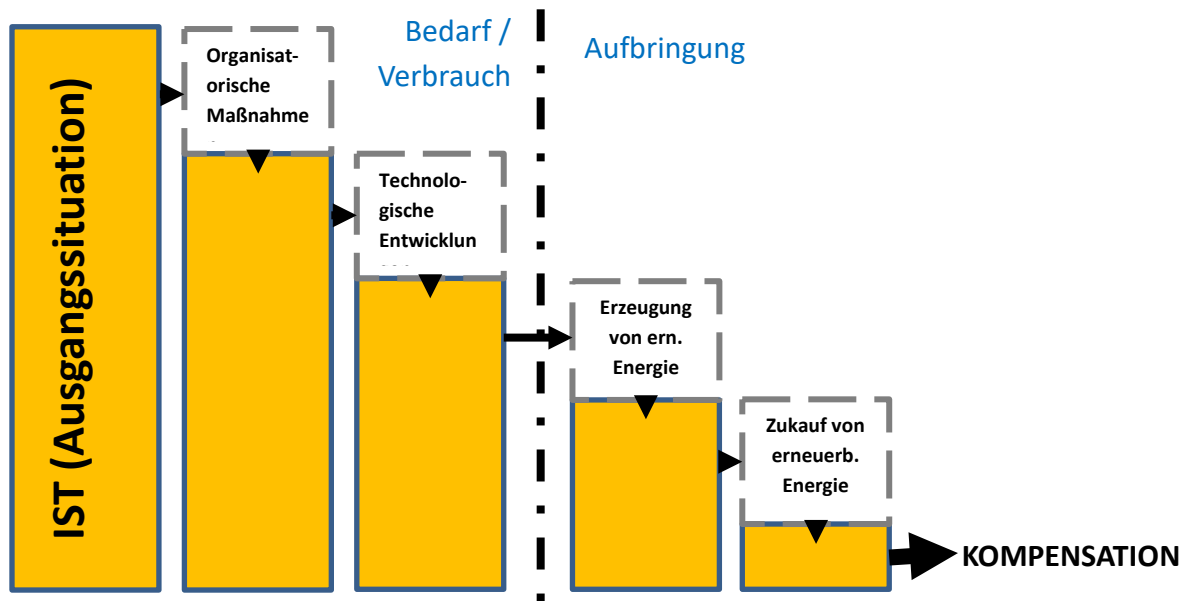


Abbildung 12: Stufenplan zur Verringerung der THG-Emissionen

#### 4.7.1. Methodik zur Bewertung der Einsparpotentiale

In den folgenden Punkten werden die Einsparpotentiale ausgearbeitet. Dabei werden die Werte der Maßnahmen zur Reduktion und Stromproduktion zum Beitrag zur CO<sub>2</sub>-neutralen Baustelle quantifiziert. Die zugeordneten Werte sind entweder absolut oder als Prozentwerte angegeben.

Neben dem Beitrag zur Zielerreichung werden die technologische Verfügbarkeit, die Kosten und die Schwierigkeit in der Umsetzung der jeweiligen Maßnahme überprüft. Die Auswertung erfolgt tabellarisch in Form einer farblich gekennzeichneten Matrix. Es wird ein Beurteilungsschema der vier Kategorien zu Grunde gelegt. Die Potentiale der jeweiligen Kategorien werden mittels Ampelsystem (z.B. gering – mittel – groß) bewertet und sollen einen ersten Überblick über die Eigenschaften der Maßnahmen geben. Die Beurteilungskriterien sind wie in Tabelle 2 dargestellt gegliedert:

Tabelle 2: Beispiel für den Aufbau einer Maßnahmenmatrix

	Maßnahme	Timeline			Zielerreichung			Kosten			Umsetzung		
		Erfahrung	Umsetzung	E&F	groß	mittel	gering	gering	mittel	groß	einfach	mittel	komplex
Maßnahmenbündel	Maßnahme 1	(Umsetzung)			(gering)			(gering)			(komplex)		
	Maßnahme 2	(E&F)			(groß)			(mittel)			(mittel)		
	Maßnahme 3	(Erfahrung)			(mittel)			(groß)			(einfach)		

### Timeline

Technologien, die schon länger verfügbar sind und für die es schon Erfahrungswerte und Auswertungen ihrer Effizienz sowie Wissen über etwaige Hemmnisse gibt, werden mit „Erfahrung“ (grün) bewertet. Diese Technologien haben hohe Chancen zur Umsetzung. Sind hingegen Maßnahmen erst seit kurzer Zeit in Umsetzung und existieren daher noch keine Erfahrungswerte, so werden sie mit „Umsetzung“ kategorisiert („gelb“). Technologien, die sich derzeit erst in Forschung oder Entwicklung befinden, erhalten die Benennung „F&E“ (orange). Diese Technologien, bei denen noch Hemmnisse ausgeräumt werden müssen, werden erst in Zukunft verfügbar sein, falls sie sich überhaupt durchsetzen können.

### Zielerreichung

Die Bewertung zum Beitrag zur Zielerreichung erfolgt anhand der Menge an eingespartem CO<sub>2</sub>. Diese Beurteilung beruht auf der Annahme, dass die Technologie auf einer „typischen“ Baustelle zum Einsatz kommt. Diese „typische“ Baustelle ist nicht konkret definiert. Zum Beispiel wird bei Förderbändern davon ausgegangen, dass es sich um eine Tiefbau-Baustelle mit hohen Massenbewegungen handelt, bei der Verwendung alternativer Heizsysteme für die Bauheizung wird von Hochbau-Baustellen ausgegangen. Es handelt sich hierbei um eine qualitative Bewertung, eine genauere Beschreibung der Einsparpotentiale der wichtigsten Maßnahmen ist den Kapiteln 4.7.2 bzw. 4.7.3 dem Fließtext zu entnehmen.

### Kosten

Hier werden die Kosten der Maßnahme in Relation zu den Gesamtbaukosten beschrieben. „Gering“ (grün) wird für Maßnahmen vergeben, die sehr wenig Kosten verursachen, kostenneutral sind oder sogar einen wirtschaftlichen Vorteil bringen. Dies betrifft hauptsächlich Maßnahmen, wo Prozesse effizienter gemacht oder eingespart werden können und die damit hohe Chancen für eine rasche Umsetzung in der Praxis haben. „Mittel“ (gelb) wird für Maßnahmen vergeben, die dem Bauunternehmer/der Bauunternehmerin bzw. dem Bauherren/der Bauherrin moderate Kosten verursachen. „Groß“ (orange) betrifft Technologien, die zumindest aus heutiger Sicht wirtschaftlich kaum vertretbar sind und deren hohe Kosten dadurch ein Ausschlusskriterium darstellen. Eine genauere Aufschlüsselung der Kosten befindet sich in Kapitel 5.3.



## Umsetzung

In dieser Spalte wird der Aufwand für das Baustellenpersonal sowie die Erhöhung der Störungsanfälligkeit der Baustelle bewertet. Die Bewertung dieser Spalte erfolgt durch Abwägungen der Nebeneffekte der Maßnahmen. Es fließen Aspekte zusätzlichen Organisationsaufwands, mögliche Verzögerungen im Bauablauf bei Fehlfunktionen sowie deren Magnitude ein. Die Bewertungsparameter lauten „einfach“ (grün), „mittel“ (gelb) und „komplex“ (orange).

### 4.7.2. Verringerung durch organisatorische Maßnahmen

Die erste Stufe der Reduktion des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes stellt die Verringerung durch organisatorische Maßnahmen dar. Diese Maßnahme kann beim Transport sehr effektiv, bei den Prozessen vor Ort in ihrer Wirksamkeit sehr gering sein. Zum Beispiel können Emissionen von Leistungsgeräten durch organisatorische Maßnahmen nur sehr begrenzt reduziert werden, etwa durch Schulung von Personal oder der Umsetzung von weniger Manipulationen auf der Baustelle. Die Möglichkeiten für Maßnahmen sind vielfältig und müssen nicht unbedingt komplex sein. Beispielsweise zählen das ressourcensparende Arbeiten oder Schritte zu mehr Energieeffizienz, wie das Schließen von Fenstern bei laufender Klimatisierung oder der Einbau eines Thermostates im Baucontainer zu einfach umzusetzenden Maßnahmen.

### Reduktion durch terminliche Maßnahmen

Die Emissionen von Vorhaltegeräten können hauptsächlich durch die generelle Verkürzung der Bauzeit und damit eine kürzere Einsatzdauer der Vorhaltegeräte reduziert werden. Die Beschleunigung des Bauablaufs wird durch fortschreitende Anwendung von LEAN-Management Methoden und Digitalisierung erfolgen, wobei hier BIM, Lean-Construction und Taktplanung und -steuerung herauszuheben sind. Aber auch der Einsatz von KI und digitaler Prognosemodelle kann in Zukunft bei der Beschleunigung des Bauablaufs helfen. Das Potential für Bauzeitverkürzung durch Digitalisierung und weitere mögliche Optimierungsmaßnahmen kann abhängig vom Baustellentyp kumulativ mit bis zu 10 – 15 % angesehen werden. In Zukunft wird in der Baubranche auf einen weiteren Produktivitätszuwachs von 2 bis 3 % pro Jahr gehofft. Alleine durch bessere Ausbildung der Arbeitskräfte könnte laut Expert:innen die Produktivität durch besseres Training bzw. optimalen Einsatz der erfahrenen/ausgebildeten Arbeitskräfte für „schwierige“ Aufgaben in manchen Partien um 30 bis 40 % erhöht werden. Während diese Steigerung nicht überall in diesem Ausmaß möglich ist, sollte insgesamt eine Steigerung um 5 % machbar sein (Barbosa, et al., 2017).

Taktplanung ist die Einteilung des Bauzeitplans in verschiedene, einander ähnliche Abschnitte („Takte“), die nacheinander fertiggestellt werden. Durch einen optimal abgestimmten Terminplan jedes Taktes können die Arbeitsgruppen optimal koordiniert und die Produktivität so erhöht werden. Prozessabläufe sind bei Verwendung von Taktplanung leicht zu steuern und es ist möglich, auch bei größeren Abweichungen den Überblick und die Kontrolle zu wahren (Fiedler, 2018).

Auch das Verlegen vom Baustart, abhängig von den klimatischen Randbedingungen und der voraussichtlichen Baudauer kann eine Einsparung erwirken. In der gemäßigten Zone ist für halbjährige Baustellen ein Baustart im Winter sinnvoll, da hierdurch die Hauptbauzeit in den Frühling fällt und so Emissionen durch Heizen und Kühlen minimiert werden können. In einer Studie konnte auf diese Weise eine Reduktion der Emissionen durch Heizung von über 20 % errechnet werden (Li, Zhang, Mah, & Yu, 2017).

Tabelle 3: Matrix für Reduktionsmaßnahmen: organisatorische Maßnahmen – terminliche Maßnahmen

	Maßnahme	Timeline			Zielerreichung			Kosten			Umsetzung		
		Erfahrung	Umsetzung	E&F	groß	mittel	gering	gering	mittel	groß	einfach	mittel	komplex
<b>Management</b>	Schulung des Baupersonals	(Erfahrung)			(gering)			(gering)			(einfach)		
	Qualitätsmanagement und Monitoring	(Erfahrung)			(gering)			(gering)			(einfach)		
	Digitalisierung: BIM etc.	(Erfahrung)			(gering)			(gering)			(mittel)		
	Optimierung des Bauzeitplans (zur Vermeidung von Wintermonaten)	(Erfahrung)			Geringere Emissionen durch Heizung, genauer Wert ist abhängig von Klima, Bauzeit und verwendetem Heizsystem (mittel)			Bauzeitplan müsste sich komplett danach richten (tut er allerdings zum Teil ohnehin schon, weil Bauen im Sommer günstiger ist!) (groß)			komplex, weil sehr unrealistisch, dass Bauzeitpläne größerer Projekte sich komplett danach richten (komplex)		

### Reduktion der Emissionen von Transporten

Durch vorsichtigen Umgang mit Material können nicht nur Kosten, sondern auch Emissionen durch gänzliche Vermeidung von Transporten eingespart werden. Besonders hervorzuheben sind hierbei die Vermeidung von Transporten, die durch Wiederverwendung von Bodenaushub vor Ort oder auf nahegelegenen Baustellen möglich wird. Aushubmaterial macht oft einen großen Teil der Transporte aus und diese zeichnen sich wiederum für einen großen Teil der Emissionen verantwortlich. Auch Baustellenkurztransporte können durch digitale Lieferkonzepte (etwa in den Hubbereich des Krans) vermindert oder sogar gänzlich vermieden werden (Projektleitstelle der MD-Stadtbaudirektion der Stadt Wien, 2004).

Durch eine sorgsame Abfalltrennung erfolgt eine Reduktion des Baustellenmischabfalls. Durch Sortierinseln kann der Anteil des Mischabfalls deutlich reduziert werden. Daraus folgt eine höhere Wiederverwertungsquote der restlichen Abfallmassen. Dadurch kommt es zu einer Reduktion des Transportaufkommens (Projektleitstelle der MD-Stadtbaudirektion der Stadt Wien, 2004).

Bei vorhandener Möglichkeit sollten vor allem längere Baustellentransporte auf die emissionsärmeren Alternativen Schiene und Wasserstraße verlegt werden. Die Einsparpotentiale hängen natürlich mit den, durch die Verlagerung entstehenden Mehrkilometern zusammen. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Tonnenkilometer für Massengüter mit der Bahn sinken jedoch um 60 – 72 %, für Beförderung mit dem Schiff um 75 – 83 % (Schmied & Knörr, 2013).

Es wird von Seiten der Industrie derzeit an Logistik-Systemen gefeilt, um Transportgüter vermehrt auf die Schiene zu bekommen. Zum Beispiel hat die Firma Bernegger GmbH ein Konzept entwickelt, das es ihr erlaubt, mineralische Rohstoffe mittels Spezialcontainern, die sowohl auf

Eisenbahnwaggons als auch LKWs passen und die auch direkt auf Baustellen abgekippt werden können, zu transportieren. Hierdurch können lange Transportdistanzen mit Zügen bewältigt werden und nur der letzte Abschnitt muss im Individualtransport erfolgen (Mlinar, 2021).

Tabelle 4: Matrix für Reduktionsmaßnahmen: Transporte und Baustellentransporte

	Maßnahme	Timeline			Zielerreichung			Kosten			Umsetzung		
		Erfahrung	Umsetzung	E&F	groß	mittel	gering	gering	mittel	groß	einfach	mittel	komplex
Transporte	Verkehrsverlagerung	Nutzung eines Baulogistikplatzes/ Umschlagplatzes	Wohnhausanlage in Wien; Hochhaus in Wien (Erfahrung)		LKW-Kilometer -80 bis -90%; CO <sub>2</sub> -Emissionen: (Bahn diesel-betrieben) -54% (Bahn strom-betrieben) -91% (groß)			Fertigteiltransport +10%; Aushub +50 ÷ 100% (groß)			Voraussetzung: günstige (nahe) Lage des Umschlagplatzes (mittel)		
		Herstellung eines Gleis- oder Wasserstraßenanschlusses	Großbauvorhaben Berlin - Potsdamer Platz (Erfahrung)		In Abhängigkeit von Größe der Baustelle sinnvoll (groß)			Transport +40%; Einsparungen aufgrund zeitsicherer Versorgung (groß)			v.a. für Stadtentwicklungsprojekte; Voraussetzung: Vorlaufzeit für Konzeptentwicklung und Umsetzung (komplex)		
		Nutzung eines vorhandenen Gleis- oder Wasserstraßenanschlusses am Bauplatz	(Erfahrung)		Wenn vorhanden (groß)			Instandsetzungskosten (gering)			Voraussetzung: entsprechende/r Anlage/Anschluss hersteller- bzw. deponieseitig; geeignete Fertigteile (mittel)		
		elektrische Förderbänder	(Erfahrung)		(mittel)			(gering)			(mittel)		
	Verkehrsorganisation	Zeitfenstermanagement	Großbauvorhaben Berlin - Spreebogen - Regierungsviertel (Erfahrung)		geringeres Verkehrsaufkommen, Routenoptimierung (mittel)			keine Angaben, Schätzung (gering)			Koordinationsaufwand (einfach)		
		Abstimmung Belade- und Transportkapazität	(Erfahrung)		(mittel)			(gering)			(einfach)		
		Anlegen von Baustraßen (unter Berücksichtigung der Nachnutzung)	(Erfahrung)		(mittel)			(gering)			(einfach)		
	Reglementierung der Verkehrsmittel	Entgeltsystem in Abhängigkeit des Verkehrsträgers	Großbauvorhaben Berlin - Spreebogen - Regierungsviertel (Erfahrung)		effizientere Organisation des LKW-Transports: -40% der Fahrten (groß)			keine Angaben, Schätzung (gering)			Wahl verschiedener Verkehrsträger muss prinzipiell möglich sein; Zufahrtskontrolle und Dokumentation (einfach)		
		Entgeltsystem in Abhängigkeit der Transportentfernung	Projekt Thurnlhof Wien (Erfahrung)		Reduktion der LKW-Kilometer um 75% (groß)			Mehrkosten aufgrund mangelnder Konkurrenzunternehmen (mittel)			Voraussetzung: ausreichend Anbieter innerhalb der festgelegten Entfernung; Zufahrtskontrolle und Dokumentation (einfach)		

	Maßnahme	Timeline			Zielerreichung			Kosten			Umsetzung		
		Erfahrung	Umsetzung	E&F	groß	mittel	gering	gering	mittel	groß	einfach	mittel	komplex
Alternative Antriebssysteme	Zufahrtsbeschränkung	Projekt Thurnlhof Wien; Seestadt Aspern (Erfahrung)			Anteil emissionsarmer LKW: 85% (groß)			keine Angaben, Schätzung (gering)			Zufahrtskontrolle und Dokumentation (einfach)		
	Einführung eines Bestbieterprinzips	(Erfahrung)			(groß)			(mittel)			(einfach)		
	Elektrifizierung	Erste Elektro LKWs bereits im Einsatz (Umsetzung)			bei Voraussetzung, dass Strom klimaneutral produziert wird (groß)			(mittel)			Batterien wirken limitierend, für mobile Großgeräte schwierig (komplex)		
	Wasserstoff	Nur Prototypen (E & F)			bei Voraussetzung, dass Strom klimaneutral produziert wird (groß)			(groß)			(einfach)		
	Power-to-X (E-Fuels)	Vorhanden, aber noch nicht im großen Maßstab (Umsetzung)			bei Voraussetzung, dass Strom klimaneutral produziert wird (groß)			(groß)			(einfach)		
	Biokraftstoffe	(Erfahrung)			Nicht im großen Maßstab vorhanden, Konkurrenz zur Nahrungsindustrie (Flächen!) (mittel)			(mittel)			(einfach)		

Tabelle 5: Matrix für Reduktionsmaßnahmen: Abfallwirtschaft

	Maßnahme	Timeline			Zielerreichung			Kosten			Umsetzung		
		Erfahrung	Umsetzung	E&F	groß	mittel	gering	gering	mittel	groß	einfach	mittel	komplex
Abfallwirtschaft	Wiederverwendung und Zwischenlagerung (von Aushub, Straßenaufbruch etc.) vor Ort	Seestadt Aspern (Erfahrung)			Einsparung von LKW-Fahrten (groß)			keine Angaben, Schätzung (gering)			Voraussetzung: chemische und bodenmechanische Untersuchung im Vorfeld (einfach)		
	Wiederverwendung und/oder Zwischenlagerung (von Aushub, Straßenaufbruch etc.) auf naher Baustelle	Seestadt Aspern (Erfahrung)			(groß)			keine Angaben, Schätzung (mittel)			Voraussetzung: ausgeklügelte Logistik zwischen den Bauplätzen (mittel)		
	Trennung von Baurestmassen	Wohnhausbau Wien (Erfahrung)			Anteil der Mischabfälle -40% (groß)			keine Angaben, Schätzung (gering)			Voraussetzung: Abstimmung der Behälter an die Baustelle, Bewusstseinsbildung (einfach)		
	Sortierinsel mit eigenem Personal	Großbaustelle Graz, div. Baustellen Wien (Erfahrung)			Entsorgungsfahrten - 20%; Verwertungsquote +30% (groß)			Entsorgungskosten - 20% (im Vgl. zu individueller Entsorgung durch Professionisten) (gering)			v.a. für Großbaustellen; Voraussetzung: Platzbedarf (60-120m <sup>2</sup> pro Insel) (einfach)		
	Verwendung größerer Mulden	Großbaustelle Graz, Baustellen Wien (Erfahrung)			Entsorgungsfahrten -12 bis -20% (groß)			keine Angaben, Schätzung (gering)			(einfach)		
	Vereinbarung von Mehrwegverpackungen und Rücknahmemöglichkeiten des Baustoffhandels	(Erfahrung)			(gering)			(mittel)			(mittel)		
	Kostenverursacherprinzip	(Erfahrung)			(groß)			(gering)			(mittel)		
	Entsorgungskosten Bauherr	(Erfahrung)			(mittel)			(gering)			(einfach)		

### Aufbereitung des mineralischen Abbruchs vor Ort (urban mining)

Einsparpotentiale liegen im Bereich der Aufbereitung und Wiederverwendung mineralischen Abbruchs vor Ort, v.a. durch die Einsparung von Transporten. In Anlehnung an die fiktive Baustelle 4 – Abbruch wurden dazu folgende Szenarien abgeschätzt. Auf dieser Baustelle konnten rund 5.800 t einer Aufbereitung zugeführt werden (Angebot), rund 3.650 t wurden v.a. zur Füllung der Baugrube benötigt (Bedarf). Die fiktive Firma befindet sich in 75 km Entfernung zur Baustelle. Sie stellt die Maschinen und Materialien zur Verfügung und übernimmt den mineralischen Abbruch.

**Szenario 1 - IST fB4:** Auf der Baustelle werden rund 5.800 t mineralischen Abbruchs aufbereitet. Davon werden rund 2.900 t zur Füllung der Baugrube vor Ort verwendet, rund 2.900 t abtransportiert. Rund 750 t wurden zusätzlich antransportiert. Maschinen zur Aufbereitung werden an- und abtransportiert.

**Szenario 2 - Aufbereitung + Verwendung auf der Baustelle:** Auf der Baustelle werden rund 5.800 t mineralischen Abbruchs aufbereitet. Davon werden rund 3.650 t zur Füllung der Baugrube vor Ort

verwendet, rund 2.150 t abtransportiert. Maschinen zur Aufbereitung werden an- und abtransportiert.

**Szenario 3 - Aufbereitung am Firmenstandort + Verwendung auf der Baustelle:** Die rund 5.800 t mineralischen Abbruchs werden in der fiktiven Firma aufbereitet. D.h. die rund 5.800 t mineralischen Abbruchs werden zur Firma transportiert. Die benötigten 3.650 t zur Füllung der Baugrube werden zur Baustelle transportiert.

**Ergebnisse** (siehe Tabelle 6): Die GWP-Emissionen für die Aufbereitung sind für alle drei Szenarien gleich, weil angenommen wurde, dass die gleichen Maschinen auf der Baustelle als auch am fiktiven Firmenstandort verwendet werden. Die doch signifikanten Unterschiede in den Szenarien-Summen ergeben sich durch den Transport. Die geringsten THG-Emissionen (Szenario 2) entstehen, wenn der mineralische Abbruch auf der Baustelle gebrochen wird und der gesamte Bedarf durch das Vorort aufbereitete Material möglichst gedeckt wird. Material-Antransporte sollte möglichst vermieden werden. Die höchsten THG-Emissionen entstehen, wenn der gesamte mineralische Abbruch abtransportiert wird, extern aufbereitet wird und der Bedarf angeliefert wird (Szenario 3). Je größer die Transportdistanzen, desto größer die Unterschiede zwischen den Szenarien.

Tabelle 6: Ergebnisse Szenarien-Berechnungen Aufbereitung mineralischen Abbruchs

GWP je Prozess [kg CO <sub>2</sub> -eq]	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Aufbereitung	12.848	12.848	12.848
Transporte	31.332	21.117	64.355
<b>Summen</b>	<b>44.179</b>	<b>33.964</b>	<b>77.202</b>

### 4.7.3. Verringerung durch technologische Entwicklungen

#### Alternative Antriebe

CO<sub>2</sub>-neutrale Antriebssysteme können unter dem Begriff *renewable fuels* oder erneuerbare Kraftstoffe zusammengefasst werden. Die Energiequelle zur Gewinnung oder Herstellung erneuerbarer Kraftstoffe kann aus (natürlichen) erneuerbaren Energiequellen stammen, zum Beispiel durch Stromgewinnung aus Wind, Sonneneinstrahlung oder Wasserkraft, oder direkt aus Biomasse gewonnen werden.

Diese aus Biomasse hergestellten Bio-Fuels treiben Verbrennungsmotoren an. Einige davon, zum Beispiel der verbreitete Biodiesel HVO100, kann direkt in herkömmlichen Verbrennungsmotoren – in diesem Fall Dieselmotoren – eingesetzt werden. Andere, zum Beispiel Ethanol, benötigen einen eigenen bzw. modifizierten Motor. Die CO<sub>2</sub>-Einsparung bei Bio-Fuels bewegt sich in der Literatur zwischen 80 und 90 % (Karlsson, Rootzén, & Johnsson, 2020) (Poulsen). Mit nachhaltig erzeugtem Strom können Fahrzeuge oder Maschinen mit elektrischen Antrieben direkt, entweder über Kabel oder mit Akkus betrieben werden. Die andere Möglichkeit der erneuerbaren Kraftstoffe sind Kohlenwasserstoffe, die mit elektrischer Energie hergestellt werden. Diese Verfahren werden unter „Power to X“ zusammengefasst, wobei das „X“ in dem Zusammenhang für die verschiedenen Möglichkeiten steht. Auch die Herstellung von reinem Wasserstoff (Power to H<sub>2</sub>) fällt unter das

Power to X-Verfahren. Aus Wasserstoff und aus der Luft abgesaugtem Kohlenstoff aus Kohlendioxid werden flüssige (Power to Liquid) oder gasförmige (Power to Gas) Kraftstoffe hergestellt. Diese sind – über die Zyklusdauer ihres Einsatzes gesehen – CO<sub>2</sub>-neutral, abgesehen von dem CO<sub>2</sub>, das bei der Stromherstellung entsteht. Zu den Power to X-Kraftstoffen oder E-Fuels zählen Oxymethylether (OME), Dimethylether (DME) oder synthetisch hergestelltes Methan (*synthetic natural gas*, SNG) (Maus, W. (Hrsg.), 2019). Abbildung 14 gibt einen Überblick über alternative Antriebsformen.

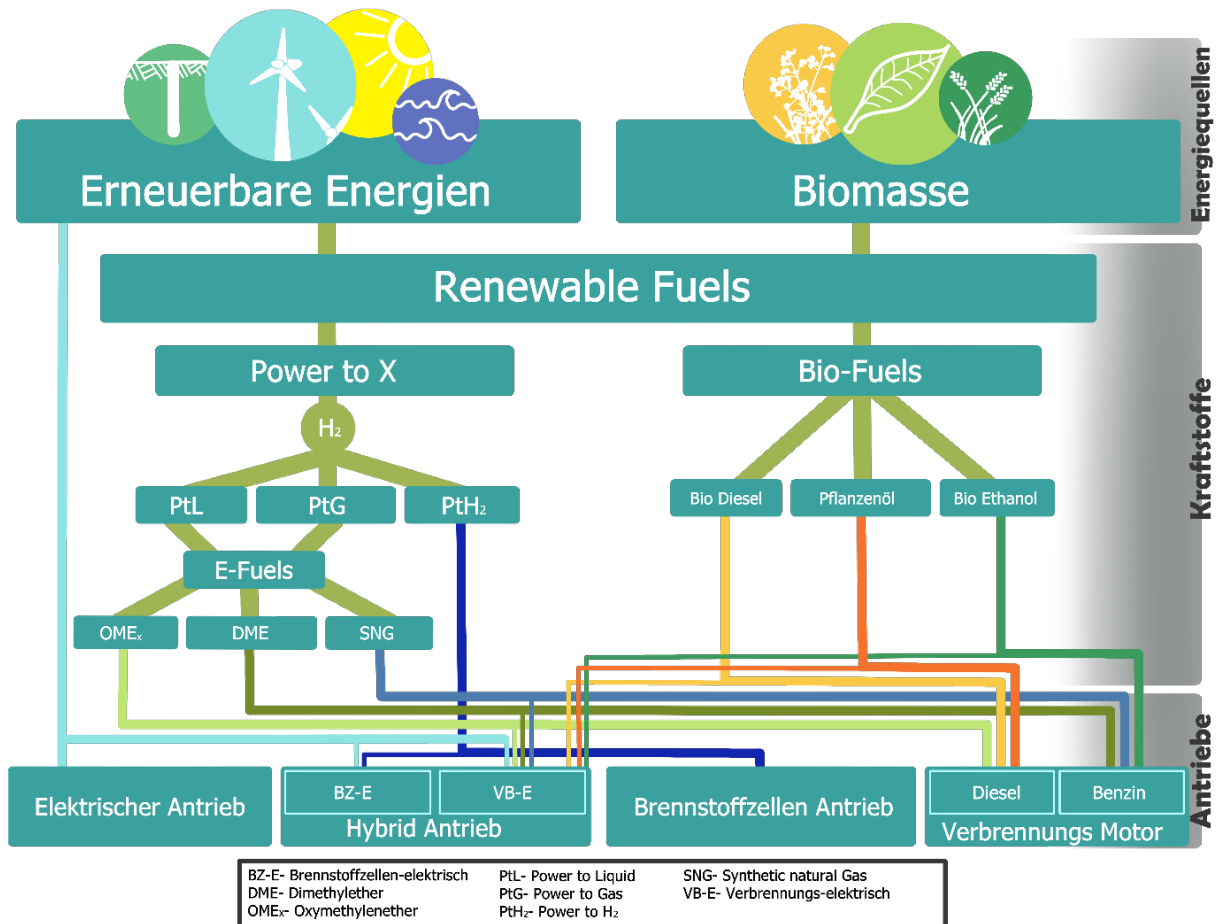


Abbildung 13: Übersicht über erneuerbare Antriebe<sup>7</sup>

Auswirkungen auf das Klima sind nicht die einzigen schädlichen Effekte der Emissionsprodukte von Verbrennungsmotoren. Für eine Gesamtbewertung müssen auch andere Schädigungspotentiale von Emissionen, wie Bodenversäuerung und Luftverschmutzung betrachtet werden. Stickoxide (NO<sub>x</sub>) sind für den Menschen schädlich und tragen zum Abbau der Ozonschicht bei. Durch die AdBlue-Technologie werden die Stickoxide mittels Zugabe von Harnstoff in einem Katalysator abgebaut, dieses Verfahren (DeNox) benötigt jedoch seinerseits Energie und trägt somit zu den Gesamt-CO<sub>2</sub>-Emissionen des Motors aktiv bei.

Es kann von einer Zunahme an elektrischen Baumaschinen bei den Maschinen unter 10 Tonnen Einsatzgewicht ausgegangen werden, jedoch ist der genaue Verlauf in den nächsten 30 Jahren nach Auskunft der Baugerätehersteller schwer abzuschätzen. Für Großbaugeräte befinden sich

<sup>7</sup> Die Grafik wurde im Rahmen einer Bachelorarbeit von Astrid Bischofberger am Institut für Interdisziplinäres Bauprozessmanagement der TU Wien erstellt (Arbeit zum Zeitpunkt des Abschlusses der Studie noch in Benotung)

elektrischen Lösungen erst in der Entwicklungsphase. Für die Branche ist nach dem jetzigen Stand der Entwicklung ungewiss, wie sich der Anteil der elektrischen Baumaschinen im Verhältnis zu Hybrid- und Off-Grid-Maschinen entwickeln wird.

Kabelelektrische Baumaschinen sind für die Umwelt günstiger, da keine oder nur kleine Akkus verbaut werden. Für mobile Geräte ist das entscheidende Kriterium die Batteriestärke. Es wird viel davon abhängen, wie sich die Batterietechnik entwickeln wird. Die Frage ist, ob die Leistungsfähigkeit bzw. die Energiedichte nach dem Mooreschen Gesetz voranschreitet (Verdopplung alle paar Jahre) oder der Anstieg annähernd linear oder sogar noch langsamer erfolgt. Aufgrund der materialeseitigen Beschränkungen ist es nicht möglich, hier seriöse Angaben durch Extrapolation von Trends zu treffen. Es kann jedoch grundsätzlich davon ausgegangen werden, dass der Trend zur Elektrifizierung von Baumaschinen anhält und der Anteil an elektrisch betriebenen Baumaschinen stetig zunehmen wird.

Das CO<sub>2</sub>-Einsparpotential von elektrischen Baugeräten (und auch LKWs) im Betrieb hängt stark vom verwendeten Strommix ab. So weist z.B. das Umweltbundesamt für den Strommix „Stromaufbringung Österreich“ 16-mal höhere THG-Emissionen aus als für den Strommix „Grüner Strom“ (Umweltbundesamt, 2019) (siehe auch Punkt 4.7.5). Während sich beim Vergleich mit ersteren kaum Einsparungen gegenüber dieselbetriebenen Baumaschinen ergeben, wären bei letzterem entsprechend große Einsparungen möglich.



Tabelle 7: Matrix für Reduktionsmaßnahmen: Technologische Entwicklung - Maschinen und Geräte

	Maßnahme	Timeline			Zielerreichung			Kosten			Umsetzung			
		Erfahrung	Umsetzung	E&F	groß	mittel	gering	gering	mittel	groß	einfach	mittel	komplex	
Maschinen & Geräte	Organisatorisch	Flottenmanagement und Wartungsplan	(Erfahrung)			(groß)			(gering)			(einfach)		
		Wahl der richtigen Gerätegröße und -gruppe	(Erfahrung)			(gering)			(gering)			(mittel)		
		Schulung der Baumaschinenführer	(Erfahrung)			(groß)			(gering)			(einfach)		
		Einsatz von EcoDrive-Programmen	(Erfahrung)			Emissionen -12 bis -30% in anderen Industriesektoren (groß)			(gering)			(einfach)		
	alternative Kraftstoffe	Biokraftstoffe	Volvo, Hitachi, Caterpillar - fast bei allen Baugeräten verfügbar (Erfahrung)			fossilfreie Energieträger (groß)			(gering)			(einfach)		
		Elektrifizierung	in den nächsten Jahren werden Fortschritte erwartet und Evaluierungen stattfinden (Umsetzung)			(groß)			(mittel)			(mittel)		
		Wasserstoff	Hitachi, Volvo (E & F)			Reduktion CO <sub>2</sub> Emissionen -95% (groß)			hohe Kosten (groß)			Verfügbarkeit, Batteriebetrieb (mittel)		
		E-Fuels	(E & F)			(groß)			(groß)			(einfach)		
	Innovationen	Einsparung bei Hydraulik	(Umsetzung)			(gering)			(gering)			(einfach)		
		alternative Bremssysteme und Drehmomenten-umwandler	(Umsetzung)			Kraftstoffverbrauch bis zu 15% (gering)			(gering)			(einfach)		

## Bauverfahren

Beim grabenlosen Leitungsbau entfällt das Aufgraben der Künette, wodurch dieses Bauverfahren im Vergleich zur herkömmlichen Künettenbauweise eine viel geringere CO<sub>2</sub>-Bilanz aufweist. Durch Einsparung von Erdbewegungen können bis zu 98 % aller LKW-Fahrten eingespart werden. Für die Betonherstellung ist anzumerken, dass es durch eine höhere Effizienz in einem Betonfertigteilwerk zu einer Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Produktkette kommen kann (Projektleitstelle der MD-Stadtbaudirektion der Stadt Wien, 2004). Bei der Verwendung von Niedrigtemperaturasphalt entfällt das Aufheizen des Bitumens. Dieses Aufheizen ist sehr energieintensiv, weswegen das Verwenden

von Niedrigtemperaturasphalt eine sparsamere Variante darstellt (Umweltbundesamt, 2009). Hierdurch kann bis zu 60 % an Energie eingespart werden (Karlsson, Rootzén, & Johnsson, 2020).

Tabelle 8: Matrix für Reduktionsmaßnahmen: Bauverfahren

	Maßnahme	Timeline			Zielerreichung			Kosten			Umsetzung		
		Erfahrung	Umsetzung	E&F	groß	mittel	gering	gering	mittel	groß	einfach	mittel	komplex
Bauverfahren	Verwendung von Fertigteilen bzw. Erhöhung des Vorfertigungsgrades	(Erfahrung)			Abfallreduktion bis - 50% (groß)			(gering)			(mittel)		
	Betonherstellung auf Baustellengelände	Seestadt Aspern (Erfahrung)			(groß)			(mittel)			Voraussetzungen: Großbaustelle mit entsprechend hohen Betonmengen, Platzbedarf (mittel)		
	Verwendung von Niedrigtemperatur-Asphalt	(Erfahrung)			(mittel)			(gering)			(mittel)		
	Grabenloser Leitungsbau	viele bewährte Verfahren werden bereits ausgeführt (Erfahrung)			Transportfahrten - 98% (sofern bei offener Bauweise Aushub nicht vor Ort gelagert und eingebaut werden kann) (groß)			(gering)			Verfahren abhängig von Leitungsführung (einfach)		

## Heizen und Kühlen

Die Verwendung der späteren Gebäudeheizung bzw. -Kühlung schon während der Bauphase kann zu geringeren CO<sub>2</sub>-Emissionen führen, sofern diese hinsichtlich CO<sub>2</sub> eine Verbesserung zum Status Quo darstellt (Fernwärme, Gas, Solar, Wärmepumpen, ...). In Norwegen werden auch Pellets als Alternative für fossile Energieträger für Heizung und Trocknung des Rohbaus vorgeschlagen, da dieses System (bis auf den Speicher für die Pellets) nicht viel Platz beansprucht und vor allem bei einer längeren Einsatzdauer auch preislich interessant ist. Auch Biokraftstoffe, v.a. Biodiesel und hydrierte Pflanzenöle (in Reinform: HVO100), können als nicht-fossile Alternative zum Einsatz kommen (Energy Norway, 2018).

Tabelle 9: Matrix für Reduktionsmaßnahmen: Heizen und Kühlen

	Maßnahme	Timeline			Zielerreichung			Kosten			Umsetzung			
		Erfahrung g	Umsetzung g	E & F	groß	mitte l	gerin g	gering	mittel	groß	einfach	mittel	komplex	
Baustelleneinrichtung	Heizung	Baucontainer, Baustelleneinrichtung optimieren	(Umsetzung)			(mittel)			(gering)			(einfach)		
		Heiz- und Trocknungsanlagen	Einsatz in Norwegen (Erfahrung)			fossilfreier Energieträger, Anlieferung beachten (mittel)			höhere Anschaffungskosten, geringere Betriebskosten (im Vgl. zu Heißluftheizung Wärmepumpen?) (mittel)			ab Heizperioden > 3 Monaten; Voraussetzung: Platz für Pelletsbehälter (einfach)		
		Pellets	Einsatz in Norwegen (Erfahrung)			fossilfreier Energieträger (mittel)			(mittel)			(mittel)		
		Fernwärme	(Erfahrung)			emissionsfreies Heizen (mittel)			(mittel)			Abstimmung mit dem Fernwärmeunternehmen; Garantiefprobleme, da System bereits in der Bauphase in Betrieb ist (mittel)		
		Geothermie	selten eingesetzt (Umsetzung)			emissionsfreies Heizen (mittel)			(mittel)			genaue Überlegungen zur Anordnung der Anlage (komplex)		
		Biofuels als Brennstoffe	(Erfahrung)			fossilfreier Energieträger (mittel)			(mittel)			(mittel)		
	Aufzug	Baustellenaufzüge mit Energierückgewinnungssystem	Testung von Prototypen (E & F)			(mittel)			keine Angaben, Schätzung (mittel)			Anwendung bei bestehenden Systemen mit geringen Änderungen der Konfiguration möglich (einfach)		

### Hybrid- und Off-Grid-Lösungen

Da die auf Baustellen zur Verfügung stehenden Strom-Anschluss-Möglichkeiten oft nicht dem Bedarf entsprechen, werden vielfach zusätzlich Dieselgeneratoren eingesetzt, um Strom Off-Grid bereit zu stellen. Das österreichische Unternehmen xelectric Power GmbH bietet Hybrid-Systeme (Diesel / Strom), welche gemeinsam den Gesamtenergiebedarf durch optimierte Steuerung senken.

Durch die Kombination von Diesel-Generatoren und dem Produkt „Power Box“ (Stromspeicher) können Lastspitzen und Lasttäler ausgeglichen werden, sodass der Generator im optimalen Wirkungsbereich läuft. Dadurch werden laut Firmenangaben Treibstoffkosten um bis zu 40 %, Wartungskosten um bis zu 50 % sowie die Luftschadstoffemissionen (CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, Feinstaub etc.) verringert.

Ein weiteres Produkt des Unternehmens ist die eigens entwickelte „Parallel Plattform Technology“. Dabei wird die Leistung des Dieselgenerators mit jener der „Power Box“ addiert. So soll auch ein kleinerer Dieselgenerator einen hohen Energiebedarf abdecken können. Dabei setzt die „Power Box“ mittels ihrer Funktion „Peak Power Boost“ Batteriestrom aus dem Speicher zur Abdeckung höherer

Lastspitzen ein, während die Generator-Steuerung den Generator ausschaltet, wenn die Leistung hauptsächlich aus dem Speicher bezogen wird (xelectrix, 2019).

Die „Power Box“ wird je nach Bedarf in acht verschiedenen Varianten der Leistung/Speicherkapazität angeboten: von 11-35 kW/20-40 kWh über 150-500 kW/140-480 kWh und 240-500 kW/480-1000 kWh bis zu 1000 kW/1000 kWh. Die „Power Box“ ist mobil und kann somit bei jeder weiteren Baustelle erneut verwendet werden (xelectrix, 2019).

#### **4.7.4. Verringerung durch Erzeugung erneuerbarer Energie auf der Baustelle**

##### **Stromerzeugung auf Baustellen**

Auf Baustellen kann die Aufbringung von Strom beispielsweise durch den Einsatz von PV-Anlagen (Zelle und Folie) und Kleinwindkraftanlagen erfolgen. Die Verwendung der späteren Haustechnikanlagen wurde bereits im Kapitel 4.7.3 behandelt.

PV-Anlagen weisen je nach Sonneneinstrahlung eine Leistung von bis zu 250 Wp/m<sup>2</sup> auf und können auf Baustellen auf Baustellencontainern oder auf freien Flächen aufgestellt werden. Darüber hinaus gibt es auch spezielle Energiecontainer, an deren Dächern PV-Paneele montiert und im Inneren Speichermodule verbaut sind, die als Off-Grid Solutions eingesetzt werden (Kantner, 2021) (Ammer, 2021) (Energy3000-solar-GmbH, 2021).

Die Firma crystalsol bietet PV-Folien an, deren Funktionsweise jener von PV-Paneele entspricht. Sie haben jedoch nur eine Dicke von 0,4 mm und sind dadurch sehr flexibel einsetzbar. Sie können als Rollos an Fenstern, Baugerüsten, Kränen und an runden Oberflächen angebracht werden. Nachteilig ist, dass PV-Folien eine maximale Leistung von ca. 100 Wp bei idealer Sonneneinstrahlung aufweisen und dass sie bei vertikaler Montage schmutzanfällig sind. (Zechmeister, 2021)

Kleinwindkraftanlagen können je nach Windverhältnissen, Rotordurchmesser und Wirkungsgrad der Anlage bei einer Leistung von 1 kW zwischen 1.000 – 1.200 kWh/a Strom produzieren, und bei einer Leistung von 5 kW entsprechend 2.000 – 10.000 kWh/a Strom produzieren. Bei dem Einsatz von Windrädern muss beachtet werden, dass gewisse Einschaltgeschwindigkeiten des Windes erreicht werden müssen, um den Rotor in Bewegung zu setzen (Jüttemann, kein Datum). Dies kann beispielweise durch die Montage auf höheren Anlagen wie Baugerüsten, -containern oder Baustellengeräten wie z.B. Kränen erzielt werden. Dabei ist auf die Gegebenheit von laminaren Windströmen zu achten, um einen möglichst hohen Ertrag zu gewährleisten. (Lafenthaler, 2021) (Kantner, 2021)

Die Beurteilung der Maßnahmen anhand der Kategorien ist Tabelle 12 zu entnehmen.

Tabelle 10: Eckdaten von PV-Anlagen (Quellen: Interviews mit (Zechmeister, 2021), (Ammer, 2021), (Ogris, 2021), (Kantner, 2021), (Madel, kein Datum) (Solaranlage Ratgeber - Photovoltaik und Solarthermie Anlagen, kein Datum))

	PV Zelle	PV Folie
<b>Anschaffungskosten gesamt</b>	Ø 383 €/m <sup>2</sup>	Ø 83 €/m <sup>2</sup>
<b>Modulkosten</b>	0,7 €/Wp 160 €/m <sup>2</sup>	0,3 €/Wp 30 €/m <sup>2</sup>
<b>Kosten für Wechselrichter, Verkabelung</b>	230 €/kW Wechselrichter; 100-500 €/100m Verkabelung je nach Kabelstärke	230 €/kW Wechselrichter; 100-500 €/100m Verkabelung je nach Kabelstärke
<b>Kosten für Montage</b>	Montagesystem: 100- 150 €/kWp Montage: 200 €/kWp	Kaum Kosten für Montage, da nur Verklebung
<b>Kosten im Betrieb (Wartung, Versicherung, ...)</b>	Ca. 20€/m <sup>2</sup> /a	Ca. 20€/m <sup>2</sup> /a
<b>Kennwerte Stromproduktion</b>	200-250 Wp/m <sup>2</sup>	100 Wp/m <sup>2</sup>
<b>Einsatzmöglichkeiten</b>	Off-Grid Lösungen, auf Container, auch modifiziert	Auf Rollos, am Gerüst, auf Container & Maschinen
<b>Probleme und Hemmnisse</b>	Netzanschluss, Beschädigung, Zeitraum, Leistungsverluste	Netzanschluss, Verschmutzung, Beschädigung, Platzbedarf, Zeitraum

Tabelle 11: Eckdaten von Windkraftanlagen und Batterie-Speicher (Quellen: (Lafenthaler, 2021), (Jüttemann, kein Datum) (Energiespeicher-Online GmbH, kein Datum))

	<b>Kleinwindkraft 1kW</b>	<b>Kleinwindkraft 5kW</b>	<b>Batterie-Speicher</b>
<b>Anschaffungskosten (inkl. Montage)</b>	5.000-6.000 €	Ø4.500 €/kW (22.500 für 5 kW)	ab 5.000 €
<b>Kosten im Betrieb (Wartung, Versicherung, ...)</b>	Keine Daten vorhanden	~3% der Anschaffungskosten	Keine Daten vorhanden
<b>Kennwerte Stromproduktion u.- speicherung</b>	1,0-1,2 MWh/a	2,0-10,0 MWh/a	3-14 kWh Speicher
<b>Einsatzmöglichkeiten</b>	Container, Gerüst Kran (alles, was hoch ist)	Container, Gerüst Kran (alles, was hoch ist)	Off-Grid Lösung, Notstrom
<b>Probleme und Hemmnisse</b>	zu wenige Förderungen und zu viele Genehmigungen in Österreich, Windräder dürfen nicht zu nahestehen, d.h. viel Platz notwendig	zu wenige Förderungen und zu viele Genehmigungen in Österreich, Windräder dürfen nicht zu nahestehen, größere Windräder brauchen ein spezielles Fundament, d.h. viel Platz notwendig	Kosten

Tabelle 12: Matrix für Reduktionsmaßnahmen: Stromerzeugung

	Maßnahme	Timeline			Zielerreichung			Kosten			Umsetzung		
		Erfahrung	Umsetzung	E&F	groß	mittel	gering	gering	mittel	groß	einfach	mittel	komplex
Stromerzeugung	Wind-energie	Stromerzeugung durch Windradanlage auf einem Baukran (CO <sub>2</sub> neutrales Projekt Spreitenbach) (Umsetzung)			Erneuerbarer Energieträger (mittel)			(groß)			Genehmigung wird benötigt, geeigneter Aufstellort (bzgl. Windgeschwindigkeit und ausreichend Platz bei Aufstellung mehrerer Anlagen), Notwendigkeit von Fundamenten für größere Windräder (komplex)		
	Photo-voltaik (Zellen)	Montage auf Baustellencontainern als Off-Grid Solutions, werden beispielsweise auf Baustellen in Afrika eingesetzt (Erfahrung)			Erneuerbarer Energieträger (mittel)			(mittel)			Müssen im richtigen Winkel zur Sonneneinstrahlung montiert werden, Platzangebot muss vorhanden sein (mittel)		
	Photo-voltaik (Folien)	PV Folien sind noch in Entwicklung (E&F)			Erneuerbarer Energieträger (mittel)			(mittel)			Benötigt keine Montagekonstruktionen, kann an fast allen Oberflächen montiert werden, auch als Rollosystem erhältlich (einfach)		
	Batterie-speicher	Werden in Kombination mit PV-Anlagen als Off-Grid Solutions eingesetzt (Umsetzung)			(mittel)			(groß)			(einfach)		

#### 4.7.5. Verringerung durch Zukauf von erneuerbarer Energie

Baustrom wird meist zentral für die gesamte Baustelle bezogen. Dabei wird derzeit nicht beachtet, welcher Strommix Verwendung findet. Der österreichische Strommix weist einen höheren CO<sub>2</sub> Output auf, als Strom aus ausschließlicher erneuerbarer Energie. Daher wird der Ersatz von nicht erneuerbarer Energie durch erneuerbare Energie als eigener Schritt im Stufenplan zur Verringerung der THG-Emissionen ausgewiesen. Je höher der Anteil an erneuerbare Energie in der Stromaufbringung, desto geringer der Emissionsfaktor und desto geringer die THG-Emissionen.

Das Umweltbundesamt stellt auf der Internetseite (THG)-Emissionen verschiedener Energieträger Emissionsfaktoren für folgende drei Strommix zur Verfügung.

- **Stromaufbringung Österreich**  
„Bei der Stromaufbringung Österreich werden die inländische Stromerzeugung und die Stromimporte berücksichtigt. Der Emissionsfaktor für die inländische Stromerzeugung wird anhand des Kraftwerksparks ermittelt. Für die Stromimporte werden die Emissionsfaktoren der Stromerzeugung der Importländer herangezogen.“ (Umweltbundesamt, 2019)
- **Kraftwerkspark Österreich**  
„Es wird der österreichische Kraftwerkspark d.h. sämtliche Stromerzeugungsanlagen auf österreichischem Staatsgebiet berücksichtigt. Somit wird wie bei der österreichischen Luftschadstoffinventur das Territorialprinzip angewendet.“ (Umweltbundesamt, 2019)

- **Umweltzeichen "Grüner Strom"**

„Das österreichische Umweltzeichen definiert in der Version 5.0 vom Jänner 2018 die Kriterien für die Stromerzeugung. Der Strom muss zur Gänze aus erneuerbaren Energieträgern stammen und bestimmte Kriterien erfüllen. Diese Kriterien sind in der Richtlinie "UZ 46 - Grüner Strom" definiert. Der Emissionsfaktor wird basierend auf dem Stromerzeugungsmix der größten Anbieter ermittelt.“ (Umweltbundesamt, 2019)

Die Stromaufbringung in Österreich von 94.248 GWh für das Jahr 2016 teilt sich in 57 % erneuerbare Energie aus inländischer Erzeugung, 6 % erneuerbare Energie aus ausländischer Erzeugung, sowie 15 % nicht erneuerbarer Energie aus inländischer Erzeugung und 22 % nicht erneuerbarer Energie aus ausländischer Erzeugung (Kranzl, 2018, S. 13). „Im Jahr 2016 wurden rund 140 GWh zertifizierter Grüner Strom verkauft. Zusätzlich können bei entsprechender Nachfrage und Zahlungsbereitschaft rund 1.200 GWh bereitgestellt werden.“ (Kranzl, 2018, S. 33).

Die Tarife für Privatkunden für UZ46 Strom sind bei den meisten Stromanbietern höher als die der anderen Stromprodukte. Je nach Anbieter können diese Mehrkosten bei wenigen Prozent bis zu 30% und mehr liegen. Die Tarife für Gewerbekunden verhandeln die Stromanbieter meist individuell, daher ist es hier schwierig, Daten zu bekommen.

In dieser Arbeit werden im Wesentlichen die Empfehlungen zur Bilanzierung der Treibhausgasemissionen von Strom aus der Studie „Treibhausgasemissionen von Strom“ (Kranzl, 2018) umgesetzt. Bei den IST-Bilanzen wurde der Emissionsfaktor von ecoinvent (siehe Punkt 4.3.2) verwendet, da hier keine besonderen Maßnahmen zur Wahl des Stromprodukts gesetzt wurden. Dieser Wert entspricht in der Größenordnung dem Wert des Umweltbundesamts für Stromaufbringung Österreich. In den Szenarien-Berechnungen wird der Emissionsfaktor aus der ecoinvent Datenbank durch den Emissionsfaktor Umweltzeichen „Grüner Strom“ ersetzt (Umweltbundesamt, 2019). Dies ist das einzige Stromprodukt, das lt. oben genannter Studie als einzelnes Stromprodukt bilanziert werden darf. (Kranzl, 2018, S. 30)

#### **4.7.6. CO<sub>2</sub>-Kompensation**

Um das Ziel der CO<sub>2</sub> neutralen Baustelle zu erreichen, kann die Menge an CO<sub>2</sub>-Emissionen, die nicht vermieden werden konnte, kompensiert werden. Bei Kompensationszahlungen für unvermeidbare CO<sub>2</sub>-Emissionen geht es darum, die entstandenen THG-Emissionen an einem anderen Ort bzw. durch die Umsetzung einer anderen Maßnahme einzusparen. Diese Klimaschutzprojekte werden vom Emittenten bezahlt. (Kommunalkredit Public Consulting GmbH, kein Datum)

#### **CO<sub>2</sub>-Kompensationsprodukte in Österreich**

Folgende österreichische Produkte wurden für die vorliegende Studie näher betrachtet:

- Climate Austria (Kommunalkredit Public Consulting GmbH)
- EEC Austria-Emissionszertifikate
- KlimaKollekte Österreich

#### **Climate Austria (Kommunalkredit Public Consulting GmbH)**

Climate Österreich ist ein Programm der Kommunalkredit Public Consulting GmbH (KPC), welches 2008 in Kooperation der Partner Umweltministerium (damals BMLFW), Austrian Airlines, Flughafen Wien und Kommunalkredit Public Consulting (KPC) gegründet wurde. Mittels eines 5-Schritt-Tools



können die CO<sub>2</sub>-Emissionen von Unternehmen, Privataktivitäten sowie von Einzelflügen ermittelt, und die erforderliche Kompensation direkt in Klimaschutzprojekte investiert werden (Kommunalkredit Public Consulting GmbH, kein Datum). „Climate Austria“ bietet in- und ausländische Projekte an. In beiden Fällen werden nur Projekte nach im Voraus festgelegten Standards bzw. entsprechender Zertifizierungen ausgewählt (z.B. Gold Standard, Verified Carbon Standard). (Kommunalkredit Public Consulting GmbH, kein Datum)

Die KPC ist eine der größten Bundesförderstellen, wobei der Fokus des Fördergegenstands auf Umwelt gelegt ist. Als öffentlicher Auftrag an die KPC Zentrale gelten dabei die Feststellung der CO<sub>2</sub>-Effekte und die Bewertung internationaler Klimaschutzprojekte, ausgehend von den Verpflichtungen Österreichs im Rahmen des Kyoto-Protokolls und des Instruments „Emissionshandel“, d.h. CO<sub>2</sub>-Kompensation im Rahmen von Fördereinreichungen. (Stockinger, 2021)

Der Baubereich als Gegenstand von CO<sub>2</sub>-Kompensationen ist in Österreich noch neu, und innerhalb des Programms „Climate Austria“ konnten zum Zeitpunkt der Berichtslegung der vorliegenden Studie noch keine einschlägigen Erfahrungen gesammelt werden. Seitens der KPC/Climate Austria wird für Baufirmen generell empfohlen, selbst im Voraus eine CO<sub>2</sub>-Bilanz ihres umzusetzenden Bauvorhabens zu erstellen. Ziel dabei ist es (auch in Beratung mit der KPC/Climate Austria), neben Kompensationszahlungen für unvermeidbare CO<sub>2</sub>-Emissionen, auch möglichst CO<sub>2</sub>-emissionsarme Prozesse und Produkte für das Bauvorhaben auszuwählen. (Stockinger, 2021)

Für CO<sub>2</sub>-Kompensationen für den Baubereich wird ein Projektportfolio (Pool mit über 280 nationalen und über 40 internationalen Projekten (Kommunalkredit Public Consulting, 2019)) herangezogen; dieses beinhaltet österreichische und internationale Kompensationsprojekte. Charakteristisch für die Kompensationsprojekte im Climate Austria-Portfolio ist, dass sie – neben der Umweltkomponente (Klimaschutz) – verpflichtend auch soziale bzw. sozio-ökonomische Aspekte berücksichtigen, d.h. es handelt sich schließlich um Nachhaltigkeitsprojekte. (Stockinger, 2021)

Als Orientierung dient der – sich mittlerweile in der Praxis bewährte – Kompensationswert von 25 Euro/t CO<sub>2</sub>. Der Betrag bezieht sich auf ein konkretes Portfolio von Kompensationsprojekten – einem Mix von nationalen und internationalen Projekten. Die Berechnung dieses Wertes beruht auf den Regelungen der staatlichen Förderung in Österreich, welche sowohl Umwelt- als auch ökonomische Berechnungsgrundlagen in Betracht ziehen (Stockinger, 2021). Zu diesen Regelungen zählen das Umweltförderungsgesetz (Umweltförderungsgesetz – UFG, 1993) und die „Förderungsrichtlinien 2015 für die Umweltförderung im Inland“ (BMK, 2020).

### **EEC Austria-Emissionszertifikate**

Eine ähnliche Möglichkeit in Österreich ist der Kauf von Emissionszertifikaten von EEC Austria (EEC Energy and Environmental Consulting GmbH, kein Datum), wodurch ebenfalls die Umsetzung von Klimaschutzprojekten unterstützt wird. Ein zusätzlicher Aspekt dieser Projekte ist, dass auch die gesamte Lebenssituation der Menschen in der Projektregion verbessert wird. Auch hier gelten strenge, international anerkannte Standards für die Zulassung der umzusetzenden Klimaschutzprojekte, wie z.B. der GOLD STANDARD des WWF. Weiters werden diese Projekte in öffentlich zugängliche Register eingetragen und während der Umsetzung von anerkannten, unabhängigen Stellen beobachtet.

Bei diesem System vergehen im Durchschnitt zwei Jahre bis zur ersten Ausgabe des Emissionszertifikats, wobei Mehrfachanwendungen der Zertifikate dank eines Eintrags in ebenfalls

öffentlich zugängliche Register ausgeschlossen sind. Der Zertifikatkauf erfolgt nach einem Beratungsgespräch mit dem CO<sub>2</sub>-emittierenden Unternehmen, d.h. die Kompensationszahlung wird konkret für jeden einzelnen Fall eigens ermittelt. Auch hier wird der Prozess mit einer online-Orientierungsberechnung der CO<sub>2</sub>-Emissionen gestartet. Die unterstützten Klimaschutzprojekte werden im Ausland umgesetzt. Beispiele davon sind auf der Homepage (EEC Energy and Environmental Consulting GmbH, kein Datum) veröffentlicht.

### **KlimaKollekte**

Diese Initiative der christlichen Kirchen mit Gesellschafterhäuser und Trägerorganisationen in Deutschland, Österreich und der Schweiz bietet CO<sub>2</sub>-Emissionsberechnung mit nachfolgender Kompensation für Flug-, Bus- und Bahnreisen, Unternehmen, Haushalte, Veranstaltungen, etc. Die internationalen Klimaschutzprojekte sind nach „Gold Standard for the Global Goals“ zertifiziert. (Diakonie ACT Austria gem. GmbH - Klima-Kollekte, 2018)

### **CO<sub>2</sub>-Kompensationsprodukte im deutschsprachigen Raum**

Neben den drei angeführten österreichischen CO<sub>2</sub>-Kompensationsprodukten, welche eine breit gefächerte Liste an zu unterstützenden Klimaschutzprojekten anbieten, existieren auch weitere im internationalen Raum. Zum Beispiel stehen in Deutschland sechs Anbieter zur Verfügung, die von der „Stiftung Warentest“ besonders positiv bewertet wurden (siehe Tabelle 13).

Tabelle 13: Übersicht der sechs höchstbewerteten Anbieter von CO<sub>2</sub>-Kompensationszahlungen im deutschsprachigen Raum

<b>Anbieter</b>	<b>Homepage</b>	<b>Basisinformation</b>
<b>Atmosfair</b>	<a href="http://www.atmosfair.de">www.atmosfair.de</a>	Schwerpunkt: Flugreisen
<b>KlimaKollekte</b>	<a href="http://klimakollekte.de">klimakollekte.de</a>	Schwerpunkt für Unternehmen: Flugreisen (siehe auch KlimaKollekte Österreich)
<b>Primaklima</b>	<a href="http://www.primaklima.org">www.primaklima.org</a>	Schwerpunkt: Pflanzung von Bäumen
<b>My Climate Deutschland</b>	<a href="http://www.myclimate.org/de/">www.myclimate.org/de/</a>	Schweizer Stiftung, welche auch Kunden in der EU (z.B. Deutschland) betreut.
<b>KlimaManufaktur</b>	<a href="https://www.die-klimamanufaktur.de/">https://www.die-klimamanufaktur.de/</a>	Schwerpunkt: Klima- und Wasserschutz, grüne Energie
<b>Arktik</b>	<a href="http://www.arktisk.de">www.arktisk.de</a>	Schwerpunkt: WWF-Gold STANDARD-Projekte

Diese Übersicht zeigt, dass eine genaue Voruntersuchung des Anbieters jedenfalls notwendig ist, da einige Angebote für Unternehmen und insbesondere für Bauwerberinnen und Bauwerber nicht treffend sein können. Die Anbieter:innen haben unterschiedliche Schwerpunkte, sowohl in Bezug auf die Verursacher (z.B. Flugreisen) als auch in Bezug auf die Kompensationsprojekte (z.B. Aufforstung, grüne Energie, Wasserschutzmaßnahmen). Nicht zuletzt macht ein Blick auf die Anbieter-Homepages deutlich, dass die Berechnung der erforderlichen Kompensation unterschiedlich umfangreich gestaltet werden.

## Kosten pro Tonne CO<sub>2</sub>

Die Kosten für eine Tonne CO<sub>2</sub> variieren stark, je nachdem welche Projekte zur Kompensation herangezogen werden. Einige Anbieter haben Richtwerte, die sich aus einem konkreten Portfolio von mehreren Kompensationsprojekten errechnen. „Climate Austria“ nennt im Interview beispielsweise einen Richtwert von 25 Euro/1 t CO<sub>2</sub> (siehe Seite **Fehler! Textmarke nicht definiert.**). Die Schweizer Stiftung „myclimate“ bietet ein Portfolio an, das zumindest die Hälfte der zu kompensierenden THG-Emissionen über Schweizer Klimaschutzprojekte kompensiert. Dieses weist rund 90 CHF/1 t CO<sub>2</sub>, was derzeit rund 83 Euro entspricht (myclimate - Ihr Partner für den Klimaschutz, kein Datum). Demgegenüber hat das Deutsche Umweltbundesamt Kosten von etwa 640 Euro/1 t CO<sub>2</sub> errechnet; dieser stellt an sich den Anspruch, alle Schäden des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes in den nächsten 100 Jahren zu berücksichtigen, z.B. durch Wetterextreme, Ernteauffälle, etc. (Bünger & Matthey, 2018).

Die durchgeführte Recherche über die Möglichkeiten zu klimaschutzbezogenen

Kompensationszahlungen unvermeidbarer CO<sub>2</sub>-Emissionen lässt sich wie folgt zusammenfassen:

- Obwohl verschiedene Produkte bzw. Anbieter im Angebot stehen, handelt es sich bei allen um dasselbe Vorgehen: zuerst werden die Emissionen berechnet, danach die Höhe der Kompensationszahlung ermittelt, und schließlich wird das zu fördernde Klimaschutzprojekt ausgewählt.
- Eine weitere Gemeinsamkeit der Anbieter sind die Bereiche, in welchen für Unternehmen eine Kompensation angeboten wird: dies sind ausschließlich Flugdienstreisen, ferner auch Strom-, Heizungsenergieverbrauch oder PKW-Dienstleistungen. Erfahrungen bzw. ein direktes Angebot für den Fall „Baustelle“ bzw. „Bauen“ wird zumindest nicht öffentlich zugänglich angekündigt.
- Gemeinsam haben die Anbieter auch, dass interessierte Unternehmen allein (online) nur eine erste CO<sub>2</sub>-Emissionsberechnung durchführen können. Für alles Weitere ist eine Beratung mit dem Anbieter erforderlich.
- Variationen innerhalb der Produkte können bei den berechneten Kompensationspreisen und beim Schwerpunkt der Klimaschutzprojekte auftreten.
- Hinsichtlich der Auswahl des zu unterstützenden Klimaschutzprojektes hat das Produkt der Kommunalkredit Public Consulting GmbH den Vorteil, dass die Kompensationszahlungen für Projekte auch in Österreich (und nicht nur im Ausland) eingesetzt werden können, denn die Folgen der Klimaveränderung betreffen auch die heimische Wirtschaft sowie die Regionen in Österreich.
- Aus all diesen Gründen ist es daher für das interessierte Unternehmen sinnvoll, vor dem Beratungsgespräch die Auswahl des Produkts bzw. Anbieters grundsätzlich zu überlegen.

## 4.8. Beschreibung der Szenarien der vier fiktiven Baustellen

### 4.8.1. Szenarien 2023

Ausgehend von den Ausgangssituationen (IST) werden für jede der vier fiktiven Baustellen Szenarien für 2023 definiert. Diese sollen Möglichkeiten aufzeigen, wie der Weg zur CO<sub>2</sub> neutralen Baustelle zeitnah beschritten werden könnte. Für jeden der folgenden vier Schritte wurden je Baustelle Annahmen getroffen, die in diesem Kapitel näher beschrieben werden:

1. Verringerung durch organisatorische Maßnahmen
2. Verringerung durch technologische Entwicklungen
3. Verringerung durch Erzeugung von erneuerbarer Energie auf der Baustelle
4. Verringerung durch Zukauf von erneuerbarer (anstelle von nicht erneuerbarer) Energie

Um das Ziel der CO<sub>2</sub> neutralen Baustelle zu erreichen, besteht die Möglichkeit, in einem 5. Schritt die verbleibenden Emissionen durch Kompensation abzugelten.

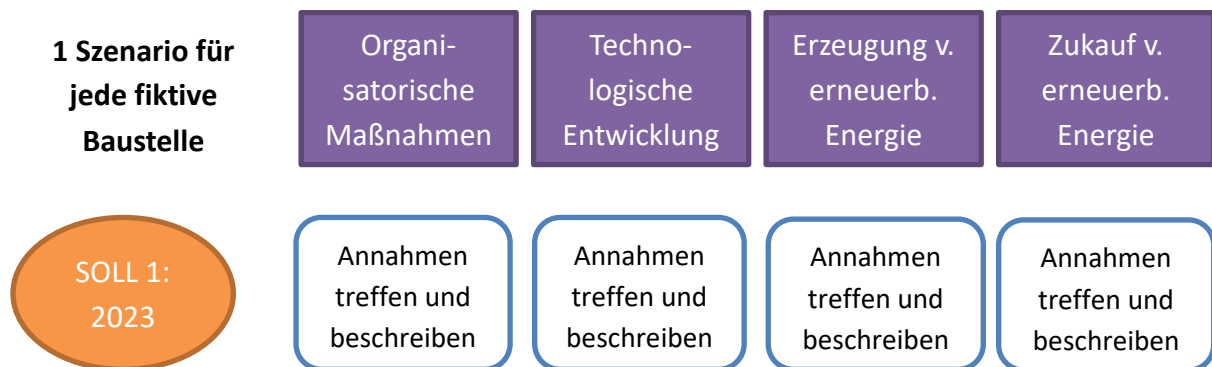


Abbildung 14: Vorgangsweise bei der Definition der Szenarien

Die folgenden Tabellen geben einen Überblick, welche Indikatoren zur Verringerung der THG-Emissionen im SOLL Szenario beeinflusst wurden. So wurden im Szenario 2023 beim **Transport** im Bereich der Sachbilanz die Transportmassen [t] und vor allem die Transportdistanzen [km] reduziert. Im Bereich der Wirkungsabschätzung wurden Transportmittel (neuere Modelle) mit geringeren THG-Emissionen, sprich niedrigere Emissionsfaktoren [kg CO<sub>2</sub>-eq/tkm] angenommen. Während für klassische Transportmittel wie LKW, Schiff und Zug in den gängigen Datenbanken meist Werte für Emissionsfaktoren zur Verfügung standen, sind diese für alternative Antriebssysteme (wie z.B. Elektro, Wasserstoffe, etc.) in den Datenbanken noch nicht in entsprechender Form integriert. Hier musste auf Literaturdaten (meist in Form von prozentuellen Reduktion gegenüber Verbrennungsmotoren) zurückgegriffen werden.

Tabelle 14: Indikatoren für die Verringerung der THG-Emissionen im Transport

Phase	Indikator (im Tool abgebildet)	Beispiele für Maßnahmen (Neben-Kalkulationen erforderlich)
Sachbilanz	1. Verringerung der zu transportierenden Massen [t]	z.B. Transportverluste vermeiden
Sachbilanz	2. Verringerung der Transportdistanzen [km]	z.B. Nähere Lieferanten auswählen
Wirkungsabschätzung	3. Einsatz von Transportmittel mit geringeren THG-Emissionen [kg CO <sub>2</sub> -eq/tkm]	z.B. alternative Transportmittel (Zug), alternative Antriebssysteme (Elektro)

Bei den **Prozessen vor Ort** wurden im Bereich der Sachbilanz die Verringerung des Energieverbrauchs pro Betriebsstunde [l/h], [MJ/h], [kWh/h] und die Verringerung der Betriebsstunden [h] angenommen. Maßnahmen, um diese Verringerungen zu erreichen, sind z.B. Verringerung der Stillstandszeiten, Energierückgewinnung durch Rekuperation, verbesserte Logistikkonzepte oder effizientere Baumaschinen. Zusätzlich wurde die Möglichkeit der Verlagerung auf andere Energieträger für das Szenario 2023 berücksichtigt. Im Bereich der Wirkungsabschätzung wurden Baugeräte mit geringeren THG-Emissionen zum Einsatz gebracht. In diesem Fall standen Literatur- und Firmendaten zur Verfügung.

Tabelle 15: Indikatoren für die Verringerung der THG-Emissionen bei den Prozessen vor Ort

Phase	Indikator (im Tool abgebildet)	Beispiele für Maßnahmen (Neben-Kalkulationen erforderlich)
Sachbilanz	1. Verringerung des Verbrauchs [l/h], [MJ/h], [kWh/h], ...	z.B. Effizientere Baugeräte
Sachbilanz	2. Verringerung der Betriebsstunden [h]	z.B. Effizienterer Bauablauf
Wirkungsabschätzung	3. Einsatz von Geräten mit geringeren THG-Emissionen je Verbrauch [kg CO <sub>2</sub> -eq/MJ], [kg CO <sub>2</sub> -eq/kWh], ...	z.B. Alternative Antriebssysteme

Die Einsparpotentiale sind von Baustelle zu Baustelle sehr verschieden und hängen von spezifischen Voraussetzungen ab, wie beispielsweise Standort der Baustelle, Verfügbarkeit der Technologien,

Kosten, Platzverhältnisse, rechtliche und technische Rahmenbedingungen, etc. Folgend sind die Annahmen für die Szenarien 2023 der vier fiktiven Baustellen detailliert beschrieben.

### **Fiktive Baustelle 1 (fB1) – Wiener Wohnbau**

#### **Verringerung durch organisatorische Maßnahmen**

- Reduktion der Transportkilometer durch Wahl des nächsten Zulieferers sowie nahegelegener Deponierungsstätten: Verringerung der Transportkilometer um 46 %
- Verringerung der Stillstandzeiten von Baugeräten: 10 % Emissionseinsparung (Winkler, 2017)
- Verbesserte Logistikkonzepte: 5 % weniger Einsatz für Bagger durch weniger Manipulation
- Intelligenter Baubeginn: 20 % weniger Emissionen für Heizen und Kühlen
- Verringerung durch technologische Entwicklungen
- Einsatz von Hybriden Baugeräten (Baggern): 20 % weniger Emissionen (Committee for European Construction Equipment and CEMA European Agricultural Machinery CECE, 2018)
- Einsatz von Niedrigtemperaturasphalt: 60 % weniger Emissionen beim Asphalteinbau
- Verwenden von elektrischen Mischertrommeln
- Verwendung von modernen Maschinen, z.B. Kräne: 15 % Energierückgewinnung durch Rekuperation

#### **Verringerung durch Erzeugung von erneuerbarer Energie Vorort**

- PV-Folie auf der Fassade (Gerüst, 800 m<sup>2</sup>, 1 Jahr)
- PV-Module auf den Containern (5\*10 m<sup>2</sup>, 2 Jahre)
- 3 Windkraftanlagen a 1,1 kW und 1 a 6 kW (jeweils 1,5 Jahre)

#### **Verringerung durch Ersatz von nicht erneuerbarer Energie durch erneuerbare Energie**

Der verbleibende Strombedarf wird zur Gänze über den Zukauf von Grünen Strom (UZ46) gedeckt.

#### **CO<sub>2</sub>-Kompensation**

25 EUR/t CO<sub>2</sub>-eq

### **Fiktive Baustelle 2 (fB2) – thermische Sanierung eines Wohngebäudes**

#### **Verringerung durch organisatorische Maßnahmen**

- Reduktion der Transportkilometer durch Wahl des nächsten Zulieferers sowie nahegelegener Deponierungsstätten: Verringerung der Transportkilometer um insgesamt 5 %
- Verringerung der Stillstandzeiten von Baugeräten: 10 % Emissionseinsparung
- Verbesserte Logistikkonzepte: 5 % weniger Einsatz für Bagger durch weniger Manipulation
- Intelligenter Baubeginn: 20 % weniger Emissionen für Heizen und Kühlen

#### **Verringerung durch technologische Entwicklungen**

- Einsatz von hybriden Baugeräten (Baggern): 20 % weniger Emissionen
- Einsatz von Niedrigtemperaturasphalt: 60 % weniger Emissionen beim Asphalteinbau
- Verwendung von modernen Kränen und Materialaufzügen: 15 % Energierückgewinnung durch Rekuperation

#### **Verringerung durch Erzeugung von erneuerbarer Energie Vorort**

PV-Module auf den Containern (5\*10 m<sup>2</sup>, 2/3 Jahre)

#### **Verringerung durch Ersatz von nicht erneuerbarer Energie durch erneuerbare Energie**

Der verbleibende Strombedarf wird zur Gänze über den Zukauf von Grünen Strom (UZ46) gedeckt.

#### **CO<sub>2</sub>-Kompensation**

25 EUR/t CO<sub>2</sub>-eq

### **Fiktive Baustelle 3 (fB3) – Infrastruktur / urbane Asphaltierarbeiten**

#### **Verringerung durch organisatorische Maßnahmen**

- Reduktion der Transportkilometer durch Wahl des nächsten Zulieferers sowie nahegelegener Deponierungsstätten: Verringerung der Transportkilometer um insgesamt 0,8 %
- Intelligenter Baubeginn: 20 % weniger Emissionen für Heizen und Kühlen der Baucontainer

#### **Verringerung durch technologische Entwicklungen**

Einsatz von Niedrigtemperaturasphalt: 60 % weniger Emissionen beim Asphalteinbau. Diese Maßnahme zeichnet sich für fast die gesamten Einsparungen bei dieser Musterbaustelle verantwortlich.

#### **Verringerung durch Erzeugung von erneuerbarer Energie vor Ort**

In diesem Schritt sind keine Maßnahmen angeführt, da der verbleibende Strombedarf auf dieser Baustelle sehr gering ist (< 200 kWh).

#### **Verringerung durch Ersatz von nicht erneuerbarer Energie durch erneuerbare Energie**

Der verbleibende Strombedarf wird zur Gänze über den Zukauf von Grünen Strom (UZ46) gedeckt.

#### **CO<sub>2</sub>-Kompensation**

25 EUR/t CO<sub>2</sub>-eq

### **Fiktive Baustelle 4 (fB4) – Abriss eines Bürogebäudes**

#### **Verringerung durch organisatorische Maßnahmen**

- Reduktion der Transportemissionen durch Wahl größerer Transporteinheiten (Eisen verpressen und auf größere LKWs umladen), nahegelegener Deponien sowie Vermeidung von Leerfahrten: Verringerung der Emissionen durch den Transport um 21 %
- Reduktion der Fahrten auf der Baustelle um 15 % durch digitale Logistikkonzepte
- Verringerung der Stillstandzeiten von Baugeräten: 10 % Emissionseinsparung
- Verbesserte Logistikkonzepte: 5 % weniger Einsatz für Bagger durch weniger Manipulation

#### **Verringerung durch technologische Entwicklungen**

- Einsatz von hybriden Baugeräten (Baggern, Grader): 20 % weniger Emissionen durch diese

#### **Verringerung durch Erzeugung von erneuerbarer Energie vor Ort**

In diesem Schritt keine Maßnahmen, da es auf dieser Baustelle keinen Strombedarf gibt.

#### **Verringerung durch Ersatz von nicht erneuerbarer Energie durch erneuerbare Energie**

In diesem Schritt keine Maßnahmen, da es auf dieser Baustelle keinen Strombedarf gibt.

#### **CO<sub>2</sub>-Kompensation**

25 EUR/t CO<sub>2</sub>-eq

## **4.8.2. Szenario 2050**

2050 liegt 30 Jahre in der Zukunft. Blicken wir 30 Jahre zurück, müssen wir erkennen, dass 1990 der Treibhauseffekt bereits Thema war, und viele der in diesem Bericht beschriebenen Maßnahmen bereits bekannt oder in Entwicklung waren. Zwei Unterschiede zu damals lassen sich nach Meinung der Autor:innen heute aber manifestieren: Einerseits ist der Wille, eine CO<sub>2</sub>-neutrale Zukunft zu erreichen, heute um ein Vielfaches größer als 1990. Dadurch sind heute die bereitgestellten Ressourcen an Geld und Personal, um den anthropogenen Beitrag zum Klimawandel einzudämmen, wesentlich höher als damals. Andererseits sind viele Technologien, die 1990 noch nicht ausgereift

waren, heute bereits marktreif. Dadurch sind die Preise gesunken und machen „grüne“ Technologien für eine breite Anwendung heute wesentlich attraktiver als noch vor einigen Jahren. Beispiele dazu sind Elektroautos und PV-Anlagen.

Nicht unerwähnt darf bleiben, dass in den letzten 30 Jahre auch eine Vielzahl von neuen Innovationen und Perspektiven in die Klimadiskussion eingebracht wurden. Auf der technologischen Seite sind Wasserstoff, Algenreaktoren, Kernfusionskraftwerke, Solarflugzeuge, CO<sub>2</sub>-Recycling aus der Atmosphäre und vieles mehr zu nennen. Ganz abgesehen von diesen Entwicklungen befindet sich zudem die Bauwirtschaft als Ganzes in einem historischen Umbruch. Wie sieht in 30 Jahren eine Baustelle aus, angesichts Digitalisierung, 3D-Drucktechnologie, Automatisierung und humanoiden Robotern; und werden diese neuen Technologien mehr oder weniger Energie benötigen, als jene, die sie substituieren werden?

Angesichts dieser Rahmenbedingungen halten die Autor:innen die Konstruktion eines detaillierten Szenarios mit Maßnahmenbeschreibung, wie es für 2023 gemacht wurde, für 2050 als nicht zielführend. Eine Vision, wie das Szenario 2050 aussehen könnte, sei an dieser Stelle beschrieben:

Im Jahr 2050 werden die Baustoffe und Bauteile von autonomen Fahrzeugen (Bahn, LKW, Drohnen) auf die Baustelle gebracht. Der Großteil der Bauelemente ist vorgefertigt. Auf der Baustelle selbst haben sich neben traditionellen Baugeräten Roboter und 3D-Drucker durchgesetzt. Die Materialverschwendung geht stark zurück, weil Material exakt dort hingedruckt wird, wo es notwendig ist. Der Personeneinsatz auf der Baustelle ist geringer als 2021. Wesentlich mehr Beschäftigte als heute arbeiten in den Bereichen Design, Konstruktion, Programmierung und Innovation. Die Energie stammt zu 95% aus erneuerbaren Quellen, weil die europäische Union ihre Ziele umgesetzt hat. Nur noch 5% müssen 2050 kompensiert werden. Dabei lief der Weg vom heutigen CO<sub>2</sub>-Niveau auf Baustellen zu jenen von 2050 nicht linear. Österreichweit gesehen, konnten die Emissionen auf Baustellen (Module A3 + A4) vor Kompensation bis 2030 um 20% verringert werden. Durch den marktreifen Durchbruch vieler CO<sub>2</sub>-neutraler Technologien in der Energieerzeugung und bei den Antriebsformen konnten bis 2040 bezogen auf das Jahr 2021 70% reduziert werden. Im Jahr 2050 sind europäische Unternehmen weltweit tätig, um andere Länder dabei zu unterstützen, klimaneutral zu werden. Ziel der EU im Jahr 2050 ist es, den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck ihrer Importe auf 0 zu reduzieren.



# 5 Ergebnisse

## 5.1. THG-Emissionen IST der vier fiktiven Baustellen

### 5.1.1. Fiktive Baustelle 1 (fB1) – Wiener Wohnbau

Die ermittelten THG-Emissionen der fiktiven Baustelle 1 betragen knapp 700.000 kg CO<sub>2</sub>-eq, wobei rund 300.000 kg CO<sub>2</sub>-eq. (42 %) dem Modul A4 „Transport“ und rund 400.000 kg CO<sub>2</sub>-eq (58 %) dem Modul A5 „Prozesse vor Ort“ zuzuordnen sind. Die Zuordnung der THG-Emissionen zu den einzelnen Prozessen kann Abbildung 16 entnommen werden.

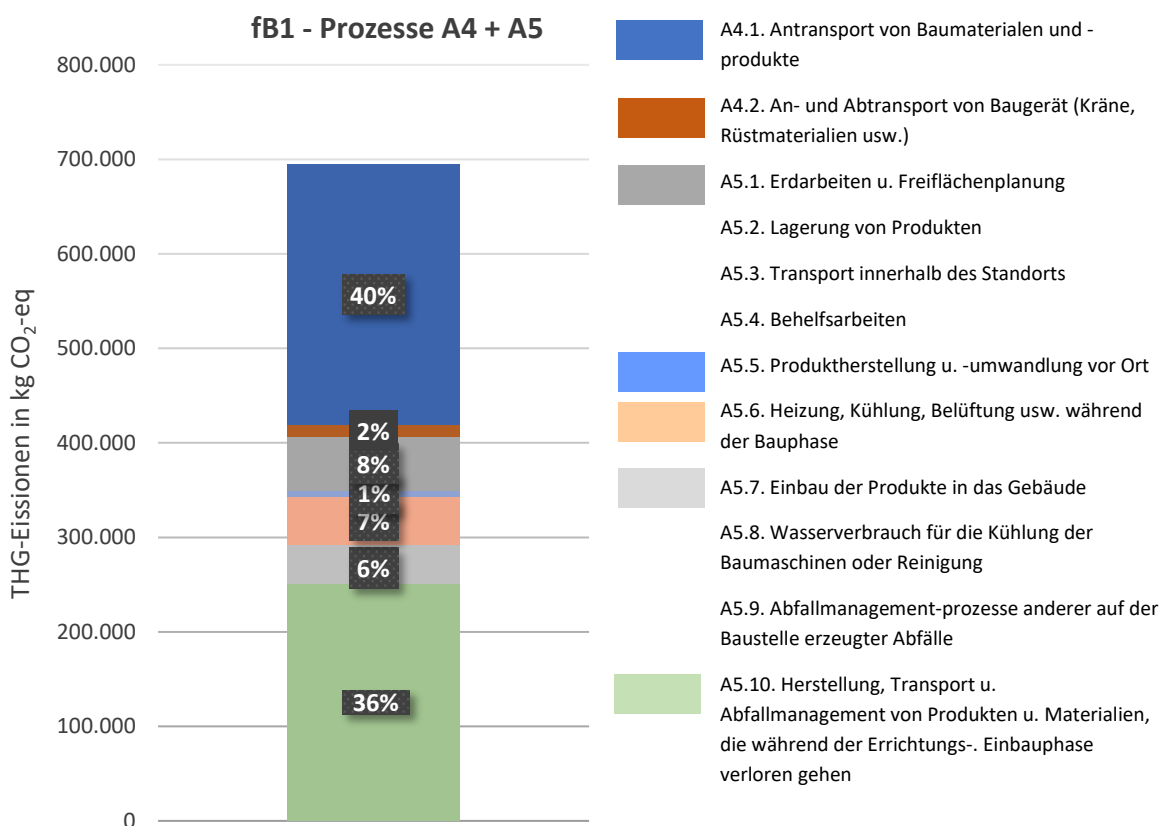


Abbildung 15: fB1 - THG-Emissionen Ausgangssituation (IST) nach Prozessen

Im Prozess A5.10. werden die THG-Emissionen für Abfallmanagement berücksichtigt; im Falle der fB1 ist das ausschließlich der Abtransport von Aushubmaterial. In Summe entfallen daher rund 77 % der THG-Emissionen der fB1 auf Transportaktivitäten. Für die Transportdistanzen standen keine spezifischen Daten von der Musterbaustelle zur Verfügung, sondern es mussten Annahmen für die fB1 getroffen werden. Aufgrund des hohen Anteils des Transports haben die Eingabedaten aber signifikante Auswirkungen – so würde eine Reduktion aller Transportdistanzen um 20 % auch die THG-Emissionen bei den Transportprozessen um 20% und damit die Gesamtemissionen der fB1 um rund 15 % verringern. Dies zeigt einerseits, dass für die Ermittlung der THG-Emissionen genaue Daten über Transportdistanzen sehr wichtig sind. Andererseits macht es deutlich, dass sämtliche Parameter, die auf Transportdistanzen Einfluss haben (wie z.B. Lage der Baustelle, Wahl der

Baustoffe, Verwertung und Wiederverwendung auf Baustellen, etc.) auch die Gesamtemissionen entscheidend erhöhen bzw. reduzieren können.

Alle Transportemissionen werden durch Diesel betriebene LKWs verursacht. Die 23 % der Emissionen, die defacto den Baustellenaktivitäten zufallen, setzen sich aus rund 9 % Energieträger Diesel und rund 14 % Energieträger Strom zusammen.

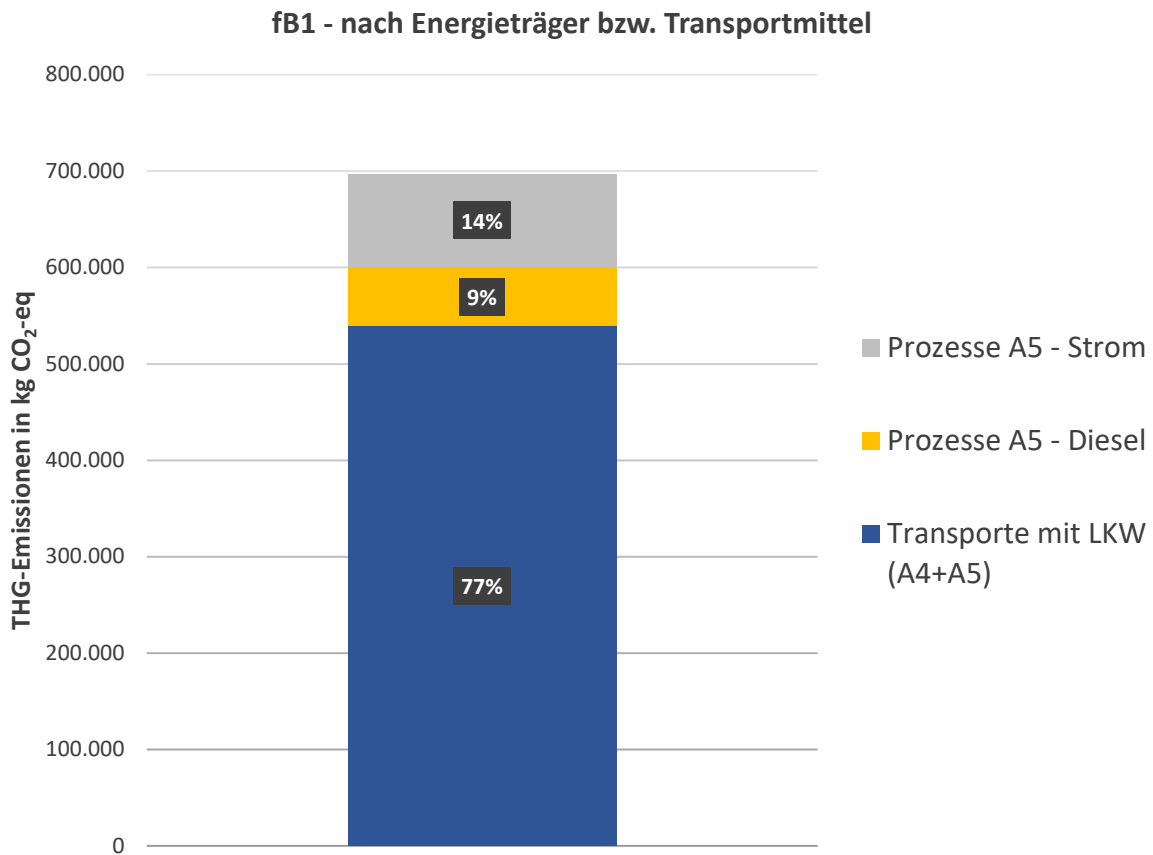


Abbildung 16: fB1 - THG-Emissionen IST nach Energieträger bzw. Transportmittel

Beim Strombedarf standen Monatswerte des Gesamtverbrauchs der Musterbaustelle zur Verfügung. Anhand dieser konnte ein Verlauf über die Bauzeit von Mai 2018 bis April 2020 ausgewertet werden. Die beiden Höchstwerte – rund 26.500 kWh im Jänner 2019 und rund 25.500 kWh im Februar 2020 - liegen jeweils in den Wintermonaten und sind ähnlich hoch. Dies lässt vermuten, dass unterschiedliche Bauphasen (Rohbauphase, Ausbauphase) weniger Einfluss auf den Stromverbrauch haben als jahreszeitlich bedingte Verbräuche, wie z.B. die Beheizung der Baucontainer oder die Baufeldbeleuchtung. Diese Vermutung müsste durch weitere Forschung untersucht werden. Insbesondere wäre es förderlich, den Strombedarf mehrerer unterschiedlicher Baustellen genau auszuwerten.

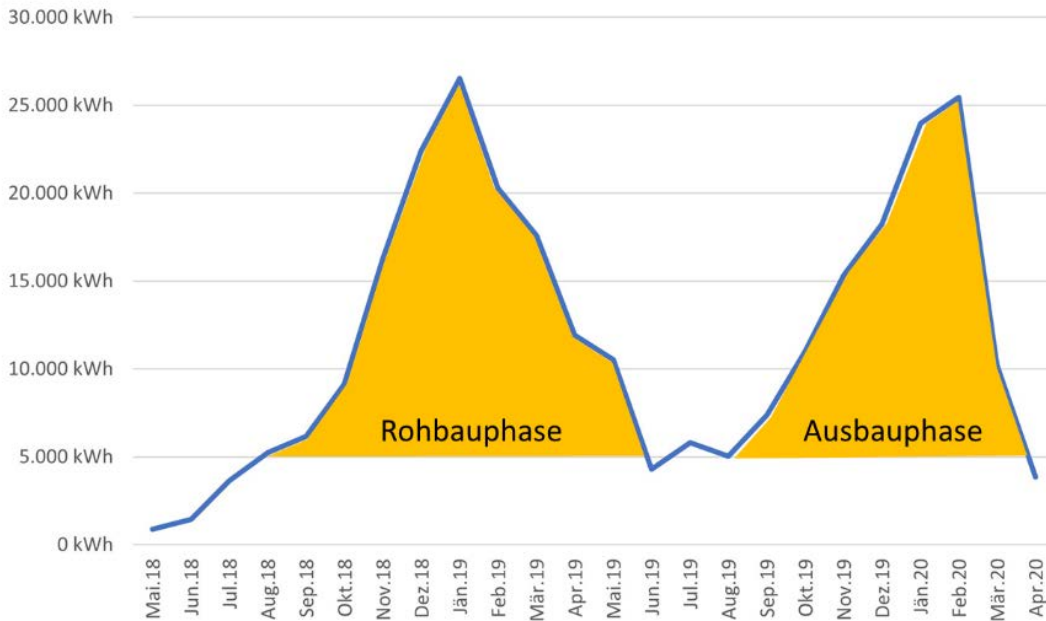


Abbildung 17: fB1 - Strombedarf nach Monaten

Stellt man die gesamten THG-Emissionen in Relation zur Bruttogeschoßfläche des Neubaus (17.000 m<sup>2</sup> BGF) so ergeben sich für die Errichtungsphase 41 kg CO<sub>2</sub> eq/m<sup>2</sup> BGF. Um einen groben Vergleich mit der Herstellungsphase von Wohnbauten zu erzielen, wurden Erfahrungswerten der RMA aus OI3-Berechnungen nach Bilanzgrenze 3 (Berechnungsmethodik OI3 siehe (IBO – Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie GmbH, 2018) ) vergleichbarer Wohnbauten herangezogen. Für die Herstellungsphase (Module A1 – A3: Rohstoffbeschaffung - Transport - Produktion) ist dieser Wert etwa 350 kg CO<sub>2</sub>-eq / m<sup>2</sup> BGF. Betrachtet man nun die Module 1 bis 4 zusammen, so entfallen rund 10 % der THG-Emissionen auf die Errichtungsphase und rund 90 % auf die Herstellungsphase (vorgelagerte Emissionen). Anzumerken ist, dass die Herstellungsphase selbst in viele Einzelteile untergliedert ist, die die Produktionskette der einzelnen Bauprodukte widerspiegelt (Dämmstoffe, Ziegel, Putze, etc.).

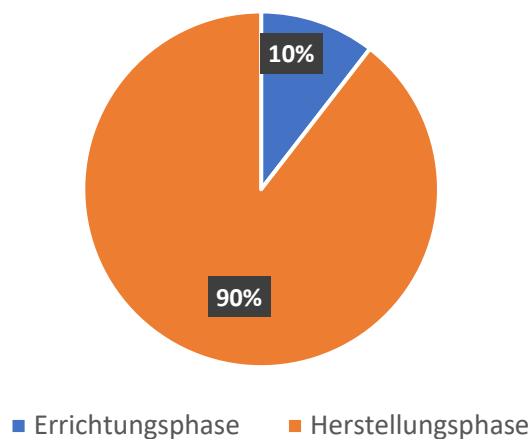


Abbildung 18: Anteile von THG-Emissionen an Lebenszyklusphasen A1 bis 4 am Beispiel fB1

### 5.1.2. Fiktive Baustelle 2 (fB2) – thermische Sanierung eines Wohngebäudes

Die ermittelten THG-Emissionen der fiktiven Baustelle 2 betragen gut 30.000 kg CO<sub>2</sub>-eq, wobei rund 12.000 kg CO<sub>2</sub>-eq (41 %) dem Modul A4 „Transport“ und rund 18.000 kg CO<sub>2</sub>-eq (59 %) dem Modul A5 „Prozesse vor Ort“ zuzuordnen sind. Die Zuordnung der THG-Emissionen zu den einzelnen Prozessen kann der folgenden Abbildung entnommen werden.

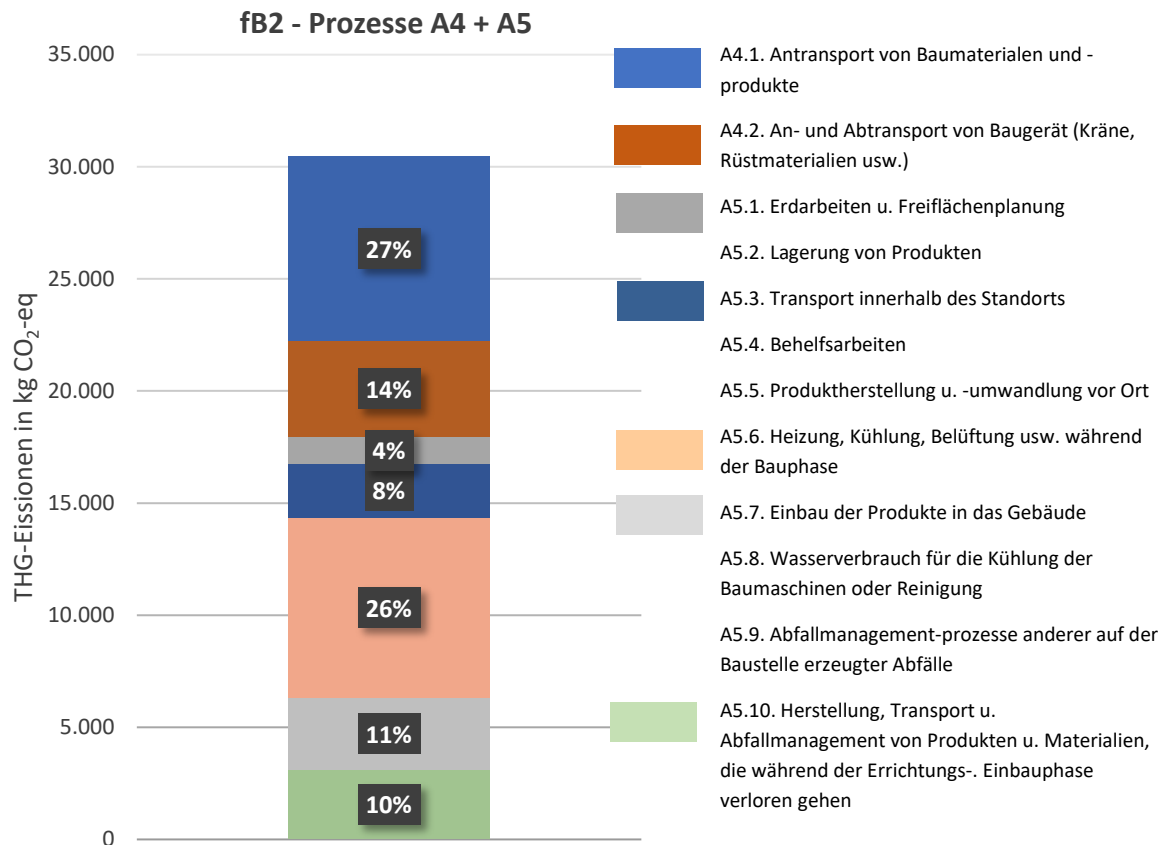


Abbildung 19: fB2 - THG-Emissionen Ausgangssituation (IST) nach Prozessen

Im Prozess A5.10. werden die THG-Emissionen für Abfallmanagement berücksichtigt; im Falle der fB2 ist das der Abtransport von Aushub- und Abbruchmaterial sowie Bauschutt und Bauabfälle. In Summe entfallen daher rund 51% der THG-Emissionen der fB2 auf Transportaktivitäten. Auch hier standen bei den Transportdistanzen keine spezifischen Daten von der Musterbaustelle zur Verfügung, sondern es mussten Annahmen für die fB2 getroffen werden. Der Anteil des Transports fällt zwar geringer aus als beim Neubau, liegt aber immer noch bei über 50%. D.h. auch bei Sanierungen sind genaue Daten über Transportdistanzen sehr wichtig.

Alle Transportemissionen werden durch Diesel betriebene LKWs verursacht. Die 49% der Emissionen, die defacto den Baustellenaktivitäten zufallen, setzen sich aus rund 9% Energieträger Diesel und rund 40% Energieträger Strom zusammen.

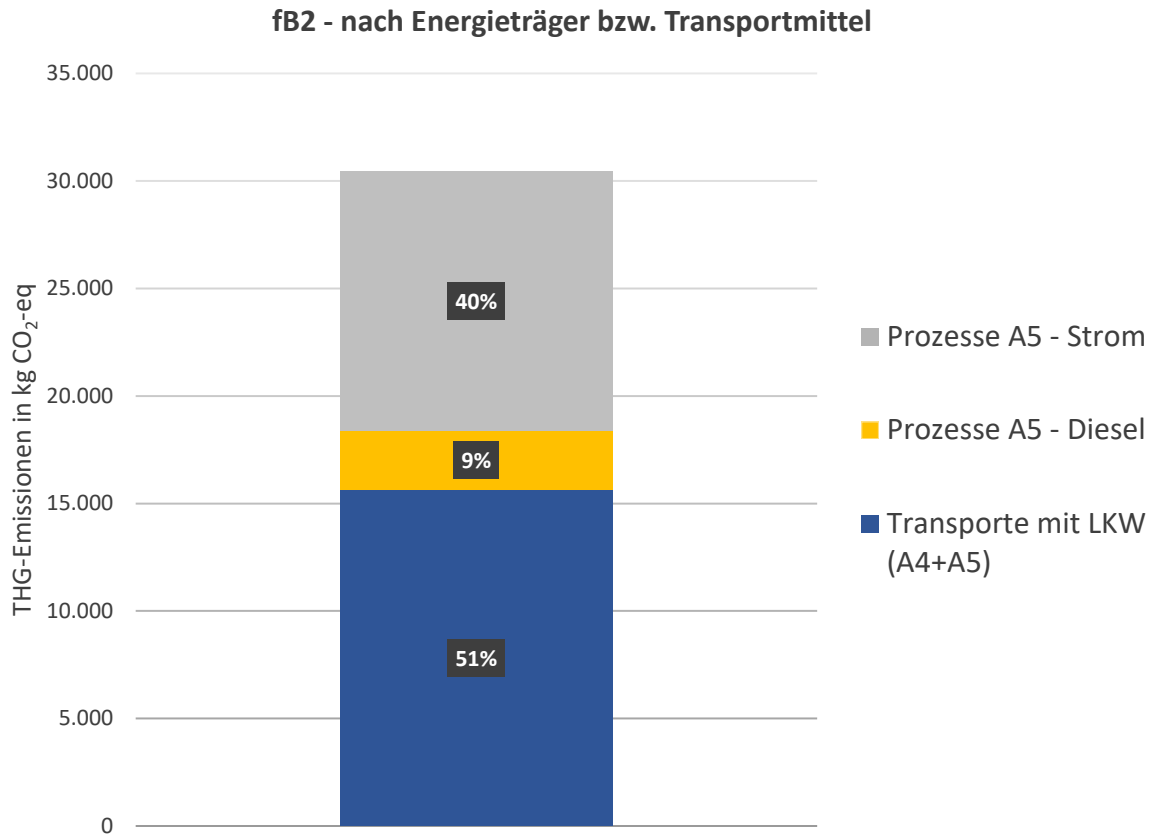


Abbildung 20: fb2 - THG-Emissionen IST nach Energieträger bzw. Transportmittel

### 5.1.3. Fiktive Baustelle 3 (fb3) – Infrastruktur / urbane Asphaltierarbeiten

Die ermittelten THG-Emissionen der fiktiven Baustelle 3 betragen knapp 8.000 kg CO<sub>2</sub>-eq, wobei rund 3.300 kg CO<sub>2</sub>-eq (41%) dem Modul A4 „Transport“ und rund 4.700 kg CO<sub>2</sub>-eq (59%) dem Modul A5 „Prozesse vor Ort“ zuzuordnen sind. Die Zuordnung der THG-Emissionen zu den einzelnen Prozessen kann der folgenden Abbildung entnommen werden.

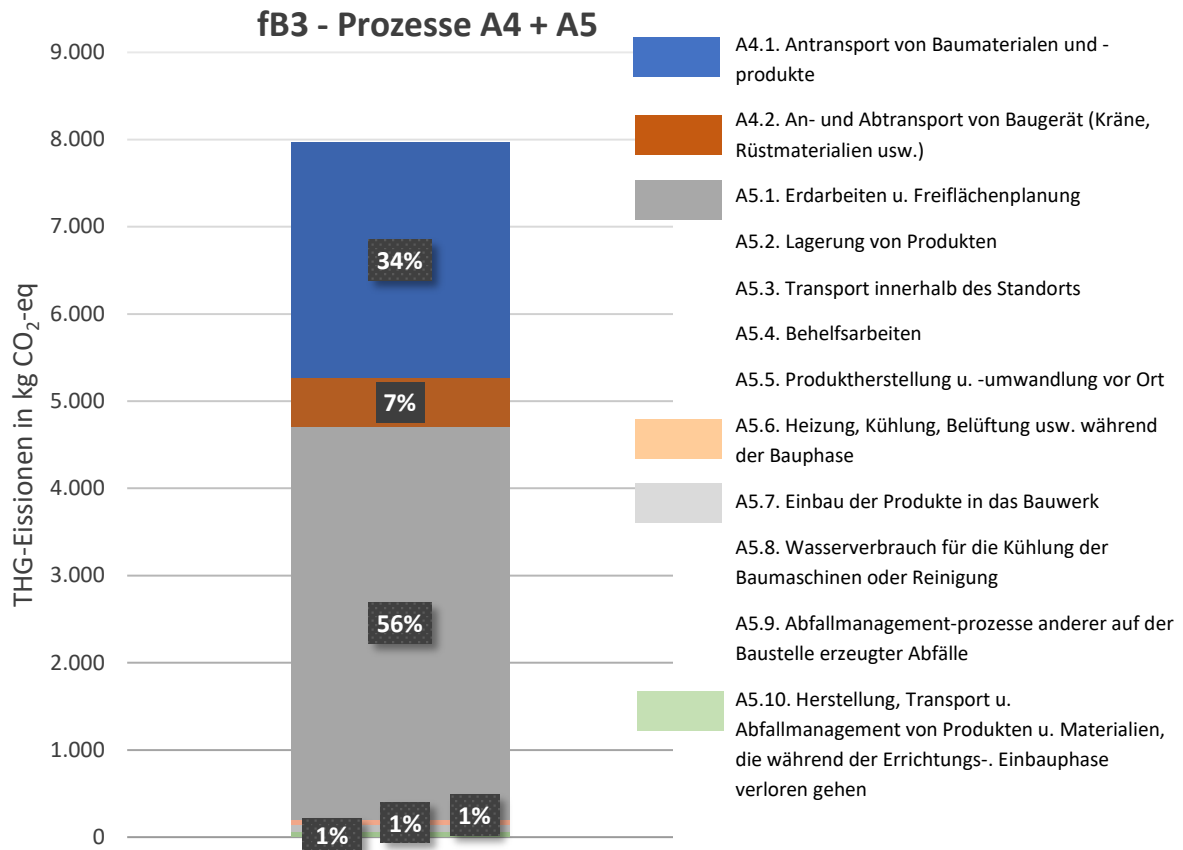


Abbildung 21: fB3 - THG-Emissionen Ausgangssituation (IST) nach Prozessen

Im Prozess A5.10. werden die THG-Emissionen für Abfallmanagement berücksichtigt; im Falle der fB3 ist das der Abtransport von mineralischem Bauschutt und Baustellenabfällen. In Summe entfallen daher rund 42% der THG-Emissionen der fB3 auf Transportaktivitäten. Bei dieser Musterbaustelle flossen reale Daten zu den Transportdistanzen in die Berechnung ein.

Alle Transportemissionen werden durch Diesel betriebene LKWs verursacht. Die 58% der Emissionen, die defacto den Baustellenaktivitäten zufallen, setzen sich aus rund 57% Energieträger Diesel und rund 1% Energieträger Strom zusammen.

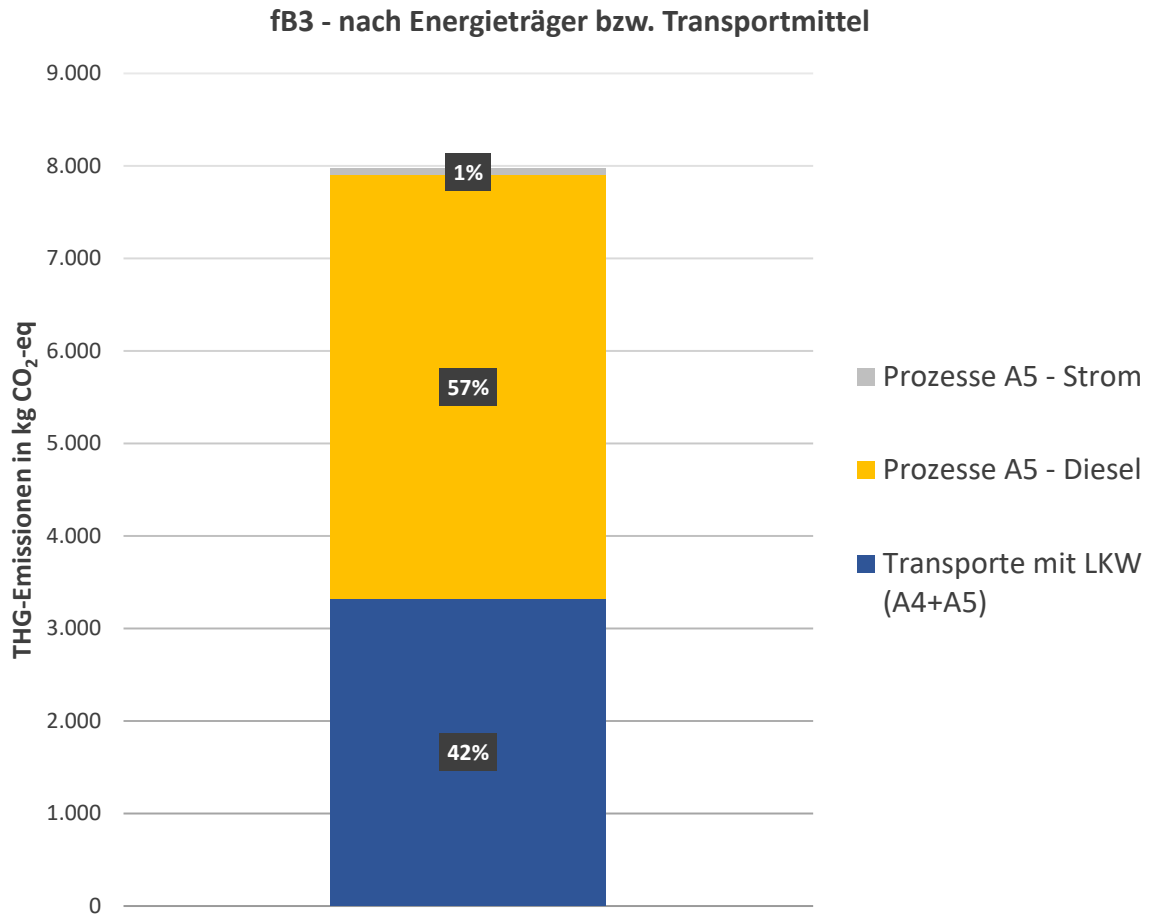


Abbildung 22: fB3 - THG-Emissionen IST nach Energieträger bzw. Transportmittel

#### 5.1.4. Fiktive Baustelle 4 (fB4) – Abriss eines Bürogebäudes

Die ermittelten THG-Emissionen der fiktiven Baustelle 4 betragen rund 240.000 kg CO<sub>2</sub>-eq, wobei rund 180.000 kg CO<sub>2</sub>-eq (74%) dem Modul C1 „Rückbau“ und rund 60.000 kg CO<sub>2</sub>-eq (26%) dem Modul C2 „Transport“ zuzuordnen sind. Die Zuordnung der THG-Emissionen zu den einzelnen Prozessen kann der folgenden Abbildung entnommen werden.

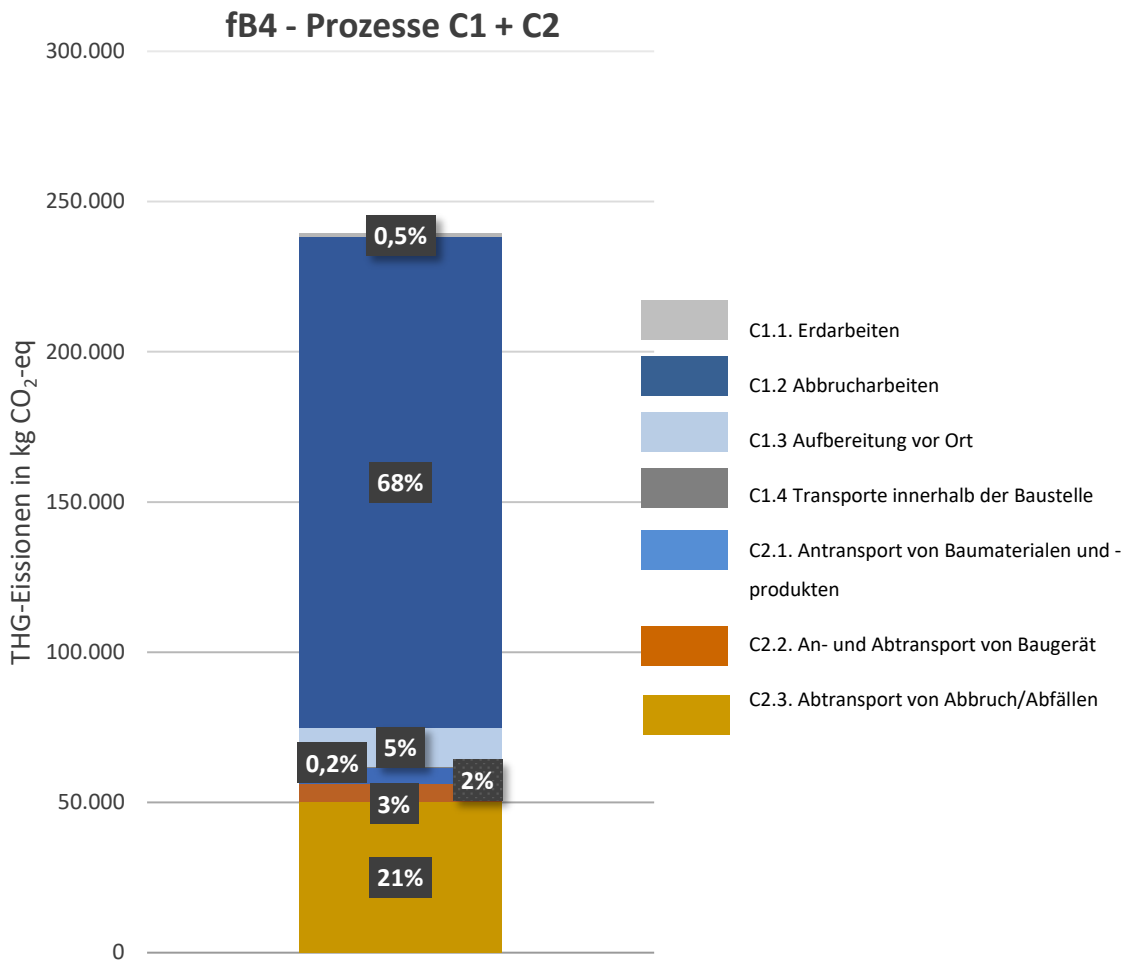


Abbildung 23: fB4 - THG-Emissionen Ausgangssituation (IST) nach Prozessen

Bei der fB4 entfallen in Summe rund 26% der THG-Emissionen auf Transportaktivitäten. Bei dieser Musterbaustelle flossen reale Daten zu den Transportdistanzen in die Berechnung ein. Alle Transportemissionen werden durch Diesel betriebene LKWs verursacht. Die 74% der Emissionen, die den Baustellenaktivitäten zuzuordnen sind, entfallen zur Gänze auf den Energieträger Diesel.

Auf der Baustelle werden rund 5.800 t mineralischen Abbruchs aufbereitet. Davon werden rund 2.900 t zur Füllung der Baugrube vor Ort verwendet, rund 2.900 t abtransportiert. Rund 750 t wurden zusätzlich antransportiert. Durch die Aufbereitung vor Ort und die zumindest teilweise Wiederverwendung vor Ort konnten hier Transportkilometer, und damit CO<sub>2</sub>-Emissionen eingespart werden (siehe dazu auch Aufbereitung des mineralischen Abbruchs vor Ort unter Punkt 4.7.2).



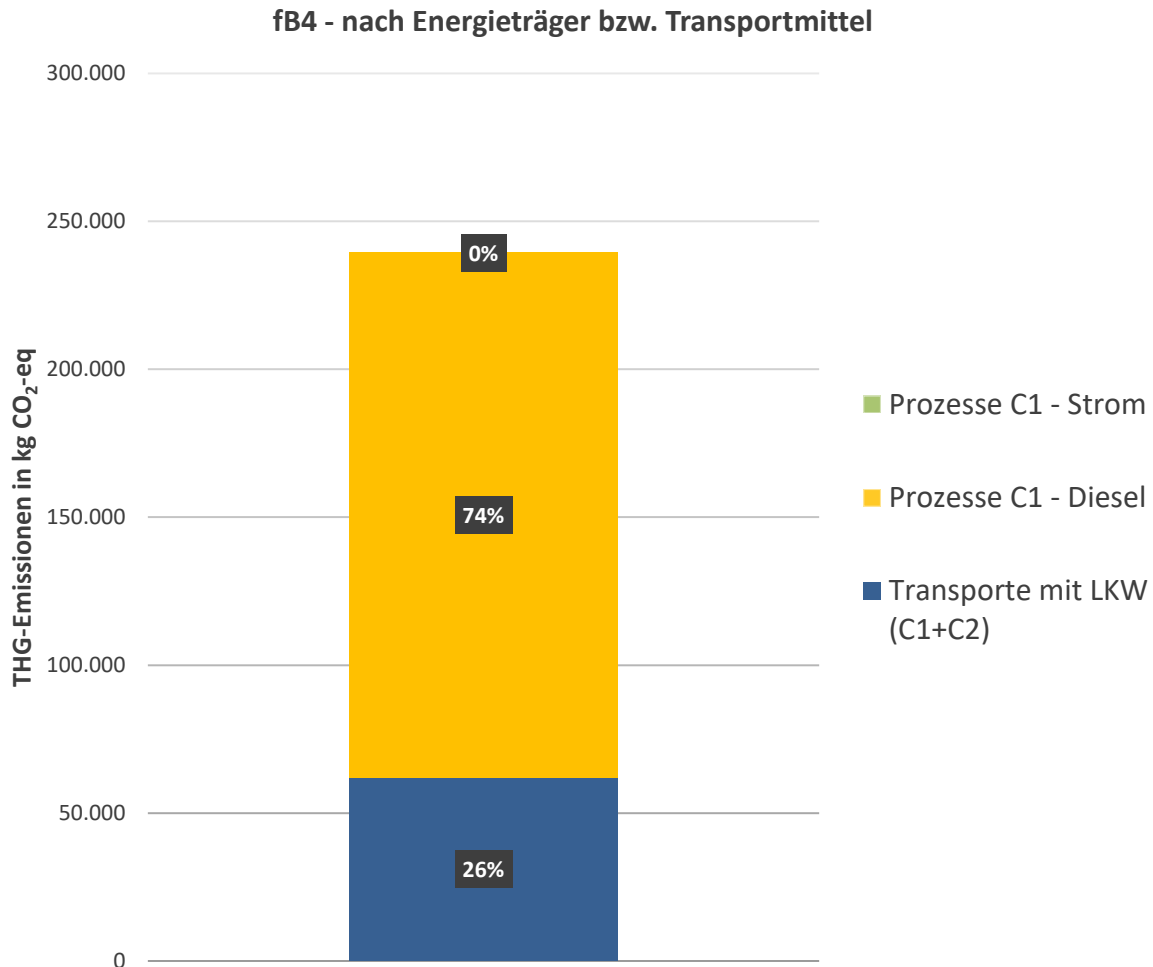


Abbildung 24: fB4 - THG-Emissionen IST nach Energieträger bzw. Transportmittel

## 5.2. THG-Emissionen Szenarien 2023 der vier fiktiven Baustellen

Die Auswertung der Szenarien beruht auf den Annahmen, die unter Punkt 4.8 beschrieben sind. Auf die Hemmnisse zu den Maßnahmensritten wird im Punkt 5.5 eingegangen.

### 5.2.1. Fiktive Baustelle 1 (fB1) – Wiener Wohnbau

Abbildung 26 zeigt die Auswertung des Szenario 2023 der fiktiven Baustelle 1 nach Einsparschritten. Um 38 % werden die THG-Emissionen im ersten Schritt „organisatorische Maßnahmen“ reduziert, diese setzen sich aus 36 % Reduktion der Transportdistanzen und 2 % Einsparungen bei Prozessen auf der Baustelle zusammen. Weitere rund 5 % werden im Schritt „technologischen Entwicklungen“ eingespart. Durch die „Erzeugung von erneuerbarer Energie (Strom) vor Ort“ werden die THG-Emissionen um zusätzliche 5 % verringert. Der verbleibende Strombedarf wird mit UZ46 „Grüner“ Strom gedeckt. In Summe ergeben diese Maßnahmensritte 48 % der ursprünglichen (IST) Emissionen. Für diese verbleibenden rund 333 t CO<sub>2</sub>-eq. müssten bei einem Preis von 25 EUR/t CO<sub>2</sub>-eq. rund 8.325 EUR an Kompensation bezahlt werden, um das Ziel der „CO<sub>2</sub> neutralen Baustelle“ zu erreichen.

## fb1 - Szenario: Soll 1 - 2023

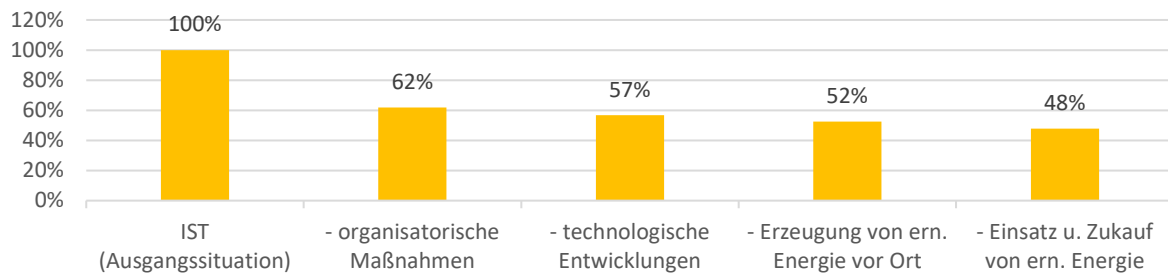


Abbildung 25: Szenario 2023 der fb1

Da, wie bereits bei der IST-Auswertung erwähnt, der Transport einen sehr hohen Anteil an den Gesamtemissionen hat, liegt in der Reduktion der Transportdistanzen auch das größte Einsparpotential. Dieses wird hier als theoretisch kurzfristig umsetzbar eingeschätzt. Technologische Entwicklungen bei Baumaschinen haben so kurzfristig ein vergleichsweise geringes Einsparpotential in Bezug auf die Gesamt-Emissionen. Die Erzeugung von erneuerbarem Strom vor Ort wird für 2023 als technologisch möglich bewertet. Da der Anteil des Strombedarfs an den Gesamt-Emissionen relativ gering ist, fällt auch die Verringerung der Emissionen gering aus. Den restlichen Bedarf über „Grünem Strom“ zu decken, ist ebenfalls sofort umsetzbar (siehe dazu auch Punkt 4.7.5.).

### 5.2.2. Fiktive Baustelle 2 (fb2) – thermische Sanierung eines Wohngebäudes

Abbildung 27 zeigt die Auswertung des Szenario 2023 der fiktiven Baustelle 2 nach Einsparschritten. Um 7 % werden die THG-Emissionen im ersten Schritt „organisatorische Maßnahmen“ reduziert, diese setzen sich aus 2,5 % Reduktion der Transportdistanzen und 4,5 % Einsparungen bei Prozessen auf der Baustelle zusammen. Weitere rund 12 % werden im Schritt „technologischen Entwicklungen“ eingespart. Durch die „Erzeugung von erneuerbarer Energie (Strom) vor Ort“ werden die THG-Emissionen um zusätzliche 6 % verringert. Der verbleibende Strombedarf wird wie UZ46 „Grüner“ Strom gedeckt – was weitere 19 % sind. In Summe ergeben diese Maßnahmenschritte 56 % der ursprünglichen (IST) Emissionen. Für die verbleibenden rund 17 t CO<sub>2</sub>-eq müssten bei einem Preis von 25 EUR/t CO<sub>2</sub>-eq rund 425 EUR an Kompensation bezahlt werden, um das Ziel der „CO<sub>2</sub> neutralen Baustelle“ zu erreichen.

## fb2 - Szenario: Soll 1 - 2023

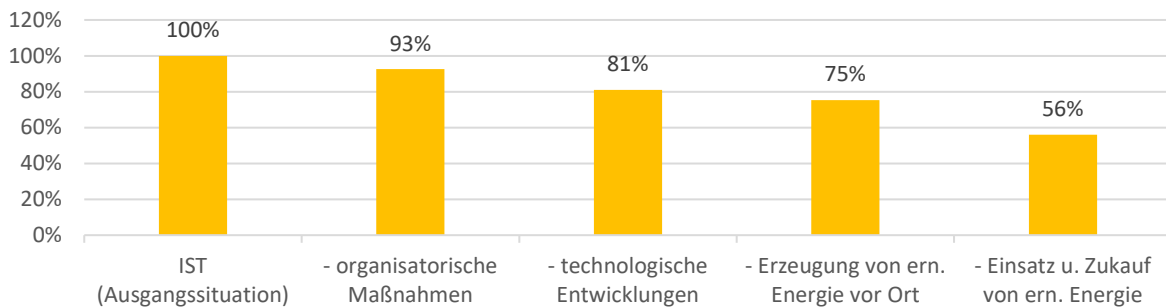


Abbildung 26: Szenario 2023 der fb2

Bei der Sanierung wird kurzfristiges Potential zur Verringerung der Transportdistanzen nur beim Abtransport des Aushubmaterials und des Betonabbruchs gesehen. Gewisse Verringerungen durch technologische Entwicklungen sind in begrenztem Maße zeitnah durch den Einsatz von modernen Baumaschinen und Baumethoden möglich. Der Anteil des Energieträgers Strom ist bei der Sanierungsbaustelle höher als beim Neubau, daher besteht hier auch mehr Einsparpotential. Im Gegensatz zum Neubau wird hier keine PV-Folie eingesetzt und daher weniger Strom produziert. Die größere Einsparung verschiebt sich daher zum Zukauf von „Grünem Strom“.

### 5.2.3. Fiktive Baustelle 3 (fb3) – Infrastruktur, urbane Asphaltierarbeiten

Abbildung 28 zeigt die Auswertung des Szenario 2023 der fiktiven Baustelle 3 nach Einsparschritten. Um nur 0,4 % werden die THG-Emissionen im ersten Schritt „organisatorische Maßnahmen“ reduziert. Weitere rund 20 % werden im Schritt „technologischen Entwicklungen“ eingespart, die zur Gänze auf den Einsatz von Niedertemperaturasphalt zurückzuführen sind. Da der Strombedarf der Baustelle bei nur rund 200 kWh liegt, wurde keine „Erzeugung von erneuerbarer Energie (Strom) vor Ort“ eingesetzt. Der Zukauf von UZ46 „Grüner“ Strom bietet demnach auch nur ein sehr geringes Einsparpotential von 1 %. In Summe ergeben diese Maßnahmenschritte 79 % der ursprünglichen (IST-)Emissionen. Für diese verbleibenden rund 6 t CO<sub>2</sub>-eq müssten bei einem Preis von 25 EUR/t CO<sub>2</sub>-eq rund 160 EUR an Kompensation bezahlt werden, um CO<sub>2</sub>-neutrale Asphaltierarbeiten zu erreichen (Hinweis: etwaige Erd- und Planierarbeiten sind in dieser Berechnung, wie bereits beschrieben, nicht enthalten!).

### fb3 - Szenario: Soll 1 - 2023

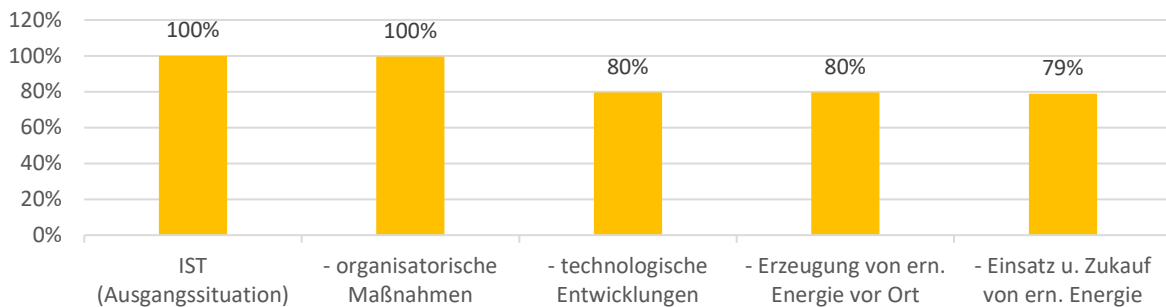


Abbildung 27: Szenario 2023 der fb3

Bei der fiktiven Baustelle 3 wird kurzfristiges Potential zur Verringerung der Transportemissionen zum überwiegenden Teil im Einsatz von Niedertemperaturasphalt gesehen. Die weiteren Maßnahmen schlagen sich in der Berechnung kaum nieder.

#### 5.2.4. Fiktive Baustelle 4 (fb4) – Abriss eines Bürogebäudes

Abbildung 29 zeigt die Auswertung des Szenario 2023 der fiktiven Baustelle 4 nach Einsparschritten. Um 15 % werden die THG-Emissionen im ersten Schritt „organisatorische Maßnahmen“ reduziert, diese setzen sich aus 5 % Reduktion der Transportdistanzen und 10 % Einsparungen bei Prozessen auf der Baustelle zusammen. Weitere rund 12 % werden im Schritt „technologischen Entwicklungen“ eingespart. Die „Erzeugung von erneuerbarer Energie (Strom) vor Ort“ sowie der den Zukauf von UZ46 „Grüner“ Strom bietet hier kein Einsparpotential, weil die fiktive Baustelle 4 keinen Strombedarf hat. In Summe ergeben diese Maßnahmenschritte 73% der ursprünglichen (IST) Emissionen. Für diese verbleibenden rund 175 t CO<sub>2</sub>-eq müssten bei einem Preis von 25 EUR/t CO<sub>2</sub>-eq rund 460 EUR an Kompensation bezahlt werden, um das Ziel der „CO<sub>2</sub> neutralen Baustelle“ zu erreichen.

### fb4 - Szenario: Soll 1 - 2023

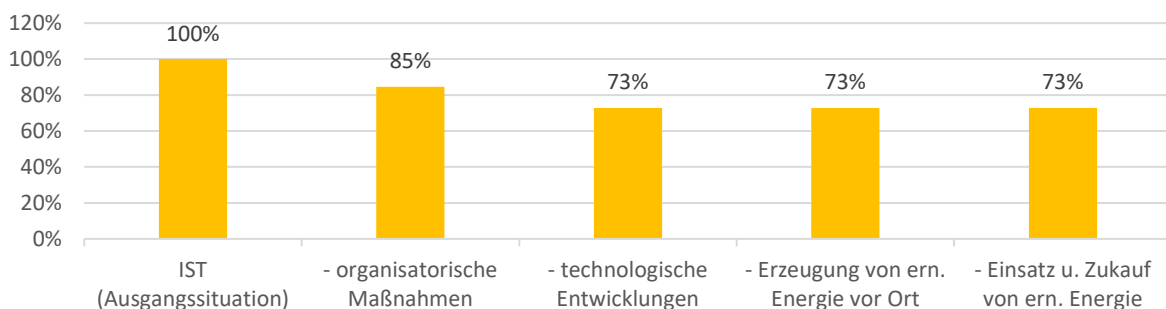


Abbildung 28: Szenario 2023 der fb4

Bei der Abbruch-Baustelle wird kurzfristiges Potential zur Verringerung der Transportemissionen v.a. beim Einsatz von größeren LKWs gesehen. Weitere Einsparmöglichkeiten liegen in verbesserten Logistikkonzepten auf der Baustelle. Gewisse Verringerungen durch technologische Entwicklungen sind zeitnah durch den Einsatz von hybriden Baumaschinen möglich.

### 5.3. Ergebnisse der Investitions-Kostenabschätzung

Das in Kapitel 4.4.1 vorgestellte Flussdiagramm wird im Folgenden genutzt, um die Investitions-Kostenabschätzung zu erläutern. In Kapitel 4.7 sind wesentliche Maßnahmen zur Reduktion von CO<sub>2</sub> auf Baustellen aufgezählt, die Kosten der eingetragenen Maßnahmen werden in Kapitel 5.3.1 erörtert.



Abbildung 29: Flussdiagramm mit konkreten Handlungsempfehlungen zu Investitionen

#### 5.3.1. Erläuterungen zu den Maßnahmen

##### Photovoltaikanlagen

Photovoltaikanlagen, die fix auf einem Containerdach montiert sind und somit durchgehend Strom liefern, amortisieren sich lt. Preisstand 2021 nach circa 15 Jahren. Danach bringen sie eine Rendite von rund 8 % des gebundenen Kapitals. Nach Abschreibung der Investitionskosten betragen die Kosten für die eigene Stromproduktion rund 9 Cent/kWh, was einer Ersparnis von ca. 12 Cent/kWh gegenüber einem Bezug bei Stromanbietern entspricht.

Auf einem Baustellencontainer (14,5 m<sup>2</sup>) können pro Jahr rund 3.200 kWh elektrische Energie erzeugt werden, das entspricht einer CO<sub>2</sub>-Ersparnis von 825 kg gegenüber dem Bezug von Strom aus dem Strommix Österreich bzw. ca. 50 kg gegenüber dem Bezug von Strom mit dem Umweltzeichen

„Grüner Strom“<sup>8</sup>. Durch die hohe Kapitalrentabilität (Return of Investment) und die dadurch kurze Amortisationszeit werden PV-Anlagen auf Containerdächern, sofern sie nicht häufig neu montiert werden müssen, in der Handlungsempfehlung als Kosten-positiv („günstig“) eingestuft.

Diese Berechnung beruht stark auf der Annahme der ganzjährigen direkten Nutzung der Solarenergie. Ist dies nicht möglich, so kann nicht benötigte elektrische Energie für 3,9 Cent/kWh wieder ins Stromnetz rückgespeist werden.

Um Überproduktion zwischenspeichern und Spitzenstunden abzudecken, ist der Zukauf von Energiespeichern möglich. Heute sind die Investitionskosten eines Energiespeichers noch sehr hoch. In der Kosten-Nutzen-Analyse kann deshalb der Ankauf eines Energiespeichers noch nicht positiv dargestellt werden.

### **Photovoltaik-Folie**

Den im Vergleich zu Photovoltaikzellen niedrigen Kosten der Photovoltaik-Folie im Betrieb (Siehe Tabelle 11) stehen geringere Stromerträge gegenüber. Die Kapitalrentabilität ist sehr gering und die Amortisationszeit so hoch, dass die Technologie aus einem rein wirtschaftlichen Gesichtspunkt aus noch nicht wettbewerbsfähig ist. Sie trägt jedoch zur Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen auf Baustellen bei. Die Kosten pro Tonne eingespartem CO<sub>2</sub> betragen in Abhängigkeit von der Lebensdauer der Folie zwischen rund 400 € und 1.200 € für eine angenommene Lebensdauer von 15 bzw. 5 Jahren.

### **Kleinwindkraftanlagen**

Kleinwindkraftanlagen sind teuer in der Anschaffung und im Betrieb. Halbwegs wettbewerbsfähig sind sie nur, wenn die Kosten für die Montage niedrig gehalten werden können. Dazu wäre ein Schnellmontagesystem notwendig. Vorteilhafter wäre ein System, welches nicht zu oft gewartet oder gewechselt werden muss. Je nach Lebensdauer der Anlagen betragen die Kosten pro kg eingespartem CO<sub>2</sub> zwischen 1,75 und 3,25 €.

### **Elektrische Baugeräte**

Durch den höheren Anschaffungspreis und den billigeren Betrieb ergibt sich, dass sich elektrische Baumaschinen umso mehr lohnen, je länger deren Vorhaldedauer angesetzt wird. Damit gleicht sich der kostengünstigere Betrieb auf lange Sicht zu den teureren Anschaffungskosten aus. Im Folgenden wurden die Anschaffungskosten, Reparaturkosten und Betriebskosten (elektrischer Strom, Diesel, Schmiermittel) von derzeit verfügbaren Baggern betrachtet.

---

<sup>8</sup> Laut CO<sub>2</sub>-Rechner des Umweltbundesamts, Datenstand: Oktober 2019

Tabelle 16: Lebenszykluskostenabschätzung für Elektrobagger im Vergleich zu vergleichbaren Dieseltiggern für verschiedene Baggergrößen und deren Anschaffungspreise (im Vergleich zum jeweils korrelierenden Dieselpendant) in Abhängigkeit der Vorhaltejahre

<b>Anschaffungskosten</b>					
<b>Elektrogerät</b>	<b>+ 20 %</b>	<b>+ 50 %</b>	<b>+ 100 %</b>	<b>+ 150 %</b>	<b>+ 200 %</b>
<b>Vorhaltejahre</b>					
<b>5</b>	-18 % ... -16 %	-8 % ... -4 %	+9 % ... +15 %	+27 % ... +35 %	+43 % ... +54 %
<b>10</b>	-27 % ... -25 %	-20 % ... -19 %	-9 % ... -8 %	+1 % ... + 3 %	+12 % ... +14 %
<b>15</b>	-30 % ... -24 %	-25 % ... -18 %	-17 % ... -8 %	-9 % ... +1 %	-1 % ... +11 %

Elektromotoren haben aufgrund schwächerer mechanischer Belastung weniger Verschleißerscheinungen als Ottomotoren. Sie sind daher im Betrieb noch einmal günstiger, weil neben den geringeren Stromkosten (im Vergleich zu den Dieselnkosten) weniger Kosten für die Reparaturen veranschlagt werden muss.

Es zeigt sich, dass der betriebswirtschaftliche Nutzen von E-Baugeräten durch die höheren Anschaffungskosten und den günstigeren Betrieb stark von der Nutzungsdauer der Geräte abhängt. Für einen Wert von +100 % in den Anschaffungskosten werden Elektrogeräte nach ca. 8 Jahren wirtschaftlich interessant, was in etwa den Nutzungsdauern von Dieseleräten entspricht. Für Elektrogeräte existieren noch keine Erfahrungswerte für ihre Haltbarkeit. Alle getroffenen Annahmen beruhen auf der Annahme, dass sie ähnlich lange nutzbar sind, wie ihr Dieselpendant.

### **Baugeräte mit Wasserstoff**

Wasserstoff kostet derzeit rund 9 € / kg, dafür hat er eine 3-fach so hohe Energiedichte wie Diesel. Wasserstoffantriebe rechnen sich derzeit nicht, da diese sowohl in der Anschaffung als auch im Betrieb teurer sind als Dieselmotoren. Derzeit betragen die Kosten pro eingespartem kg CO<sub>2</sub> je nach Lebensdauer der Baumaschine mit Brennstoffzellenantrieb zwischen 1,50 und 2 €. Es ist vorstellbar, dass durch die günstigere Gewinnung von Wasserstoff (auf nachhaltigem Weg) und Fortschritte in der Brennstoffzellentechnologie diese Antriebsart in nicht allzu ferner Zukunft den Dieselantrieb ökonomisch überholt. Für eine genaue Prognose, wann das sein wird, ist die Datenlage zu unsicher.

### **Baugeräte mit E-Fuels, Bio-Fuels**

Biodiesel hat gegenüber E-Fuels den großen Vorteil, dass Dieselmotoren keine Modifikation benötigen, um damit betrieben werden zu können. Derzeit kosten E-Fuels ca. 4,50 € je Liter und sind damit wirtschaftlich nicht konkurrenzfähig, die Kosten für die CO<sub>2</sub>-Ersparnis betragen 1,30 – 1,60 €/kg. In Zukunft ist eine Produktionsanlage für E-Fuels in Norwegen geplant, die Ende 2022 in Betrieb gehen und zehn Millionen Liter pro Jahr produzieren soll. Möglicherweise werden E-Fuels durch vermehrte Massenproduktion in Zukunft billiger, die Kosten könnten dadurch auf ein Niveau von herkömmlichem Diesel fallen, was die Verwendung von E-Fuels kostenneutral (gegenüber Dieselfahrzeugen) machen würde (Berninghausen, 2019).

Bio-Kraftstoffe, allen voran Biodiesel, bieten eine wirtschaftlich interessante Alternative zu herkömmlichem Diesel. Biodiesel kostet ähnlich viel wie normaler Diesel, der Vergleich ist jedoch nur bedingt möglich: gemäß der Kraftstoffverordnung (KVO) ist Diesel in Österreich seit 2009 ein Anteil von durchschnittlich 6,3 % Biokraftstoff beizumengen (Kraftstoffverordnung 2012). Es ist daher zu

erwarten, dass Biodiesel nicht als „purer“ Diesel auf den Markt kommen wird, sondern der Beimischungswert von Biodiesel im handelsüblichen Diesel erhöht werden wird. Die Voraussetzung für eine Marktdurchdringung dieser Technologie ist auch davon abhängig, inwieweit Anbaufläche zur Produktionssteigerung nachhaltig zu Verfügung steht.

### 5.3.2. Rückschlüsse auf die Volkswirtschaft

Die Kosten für die Zertifikate, die bei einem Verfehlen der Klimaziele von der Republik Österreich nachgekauft werden müssen, betragen je nach Schätzung zwischen 50 und 100 € pro Tonne zu viel emittiertem CO<sub>2</sub>, das entspricht 0,05 – 0,10 €/kg (Rechnungshof Österreich, 2021). Abbildung 30 vergleicht die Kosten der Maßnahmen für CO<sub>2</sub>-Einsparung anhand der Kosten pro Tonne eingespartem CO<sub>2</sub>.

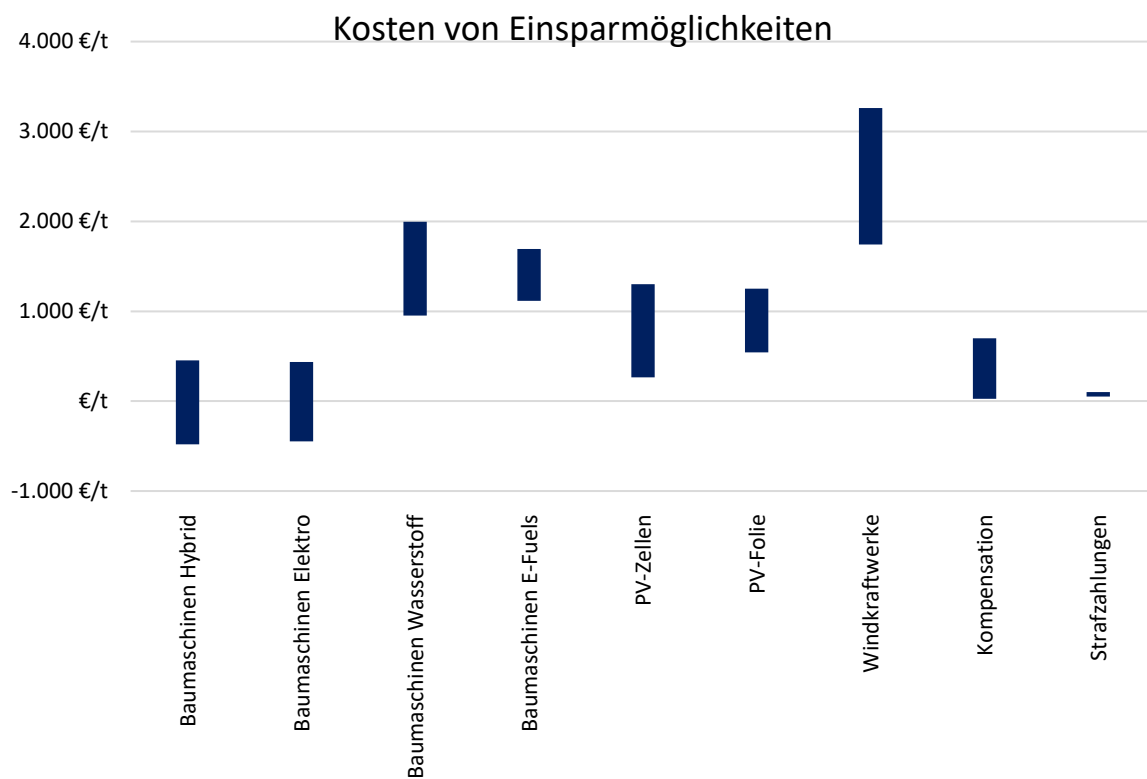


Abbildung 30: Übersicht über Kosten/Nutzen-Relation der Maßnahmen bzw. der Kompensationsmaßnahmen und Strafzahlungen durch Zertifikatkauf. Negative Werte bedeuten finanzielle Vorteile zusätzlich zu CO<sub>2</sub>-Einsparungen

## 5.4. Ergebnisse der Expert:innenumfrage

### Kraftstoffverbrauch und Datenverfügbarkeit

Die Expertinnen und Experten sind sich einig, dass die Zuordnung des Stromverbrauchs auf die Großverbraucher einfach, für die Kleinverbraucher schwierig ist. Als einzelne Verbraucher, denen der Verbrauch einfach zuordenbar ist, wurden unter anderem der Kran, das Baubüro, die Bauheizung, Wasserhaltung und einzelne Großgeräte (Tunnelbohrmaschinen) genannt. Als Baugerätegruppen, die



bereits mit Strom betrieben werden, wurden fast nur Hebezeuge (Krane) genannt. 55% der Befragten gaben an, dass der Stromverbrauch nicht den einzelnen Gewerken zuordenbar ist.

Bei der Frage nach den Kraftstoffverbräuchen (Siehe Abbildung 31) gingen die Antworten auseinander. Fast 40 % waren der Meinung, der Detaillierungsgrad über Aufzeichnungen zu Kraftstoffen sei niedrig oder sehr niedrig; über 30 % waren der Meinung, dieser sei hoch oder sehr hoch. 55 % waren der Meinung, bei der Kalkulation spiele der Kraftstoffverbrauch nur eine geringe oder sehr geringe Rolle. Bei der Auswahl der Geräte waren es immer noch 47 %, die meinten, der Kraftstoffverbrauch spiele eine geringe oder sehr geringe Rolle. Als alternative Kraftstoffe bzw. Antriebssysteme, die auf Baustellen bereits verwendet werden, wurden nur Biodiesel und Hybride Antriebe mehr als einmal genannt. 56 % der Befragten gaben an, dass es in ihrem Unternehmen keine Vorschriften oder Vorgaben bezüglich Abgaswerten von Baumaschinen gibt; 6 % gaben an, dass es derzeit in Überlegung sei. Als einzelne Umstände, die einen besonders hohen Kraftstoffverbrauch auf Baustellen verursachen, wurden die Herstellung von Außenanlagen, schwere Baugrundverhältnisse, Stromversorgung via Aggregate, schlechte Abstimmung der Lasten und Frachten, falsche Geräthewahl, das Laufen lassen von Motoren nicht benutzter Geräte, Wasserhaltungs- bzw. Grundwasserabsenkungsmaßnahmen, Schuttern, Tunnelbau bzw. Tunnelbohrmaschinen, Winterbaustellen und Beleuchtung (bei Strom durch Dieselaggregate) genannt.

### Wie würden Sie die folgenden Fragen zum Thema Kraftstoffverbrauch beantworten?

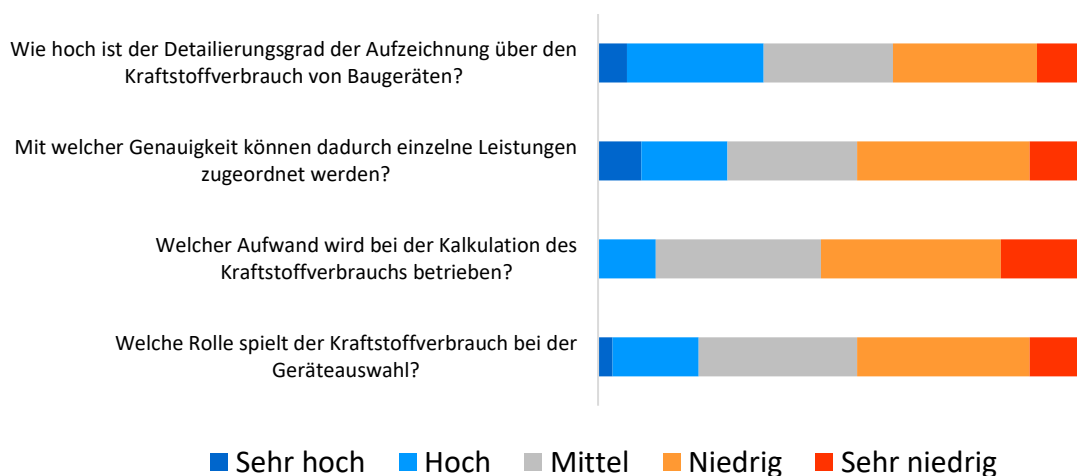


Abbildung 31: Fragen und Auswertung der Umfrage zum Thema Kraftstoffverbrauch

### Transport und Lieferantenauswahl

Als die Bauphase mit dem höchsten Transportaufkommen bei Hochbauten wurden die Aushubarbeiten genannt. Hohen Einfluss auf die Auswahl des Lieferanten haben die Aspekte Kosten, Qualität, gute Erfahrungen mit dem Lieferanten sowie Einhaltung von Terminen (jeweils > 80 % hoch oder sehr hoch). Niedrig oder sehr niedrigen Einfluss haben die Transportstrecken (54 %), emissionsarme Fahrzeuge (71 %) und umweltfreundliche Lieferung (71 %). Als Umstände, die ein besonders hohes Transportaufkommen auslösen, wurden große Aushubvolumina, weitreichende Außenanlagen, Tunnelbau- bzw. Untertagearbeiten, schlechte Terminabstimmung, Durchfahrtsbeschränkungen, schlechte Planung/Logistik, Bodenaustausch, Abbrucharbeiten, die

Phase des Innenschalenbetonierens bei Tunneln, hohe Qualitätsanforderungen an Schüttmaterial (führt zu längerer Transportstrecke), Falschlieferungen und eine zu kurz bemessene Baudauer identifiziert. In Abbildung 32 werden die Umfrageergebnisse zum Einfluss auf die Auswahl des Lieferanten qualitativ dargestellt.

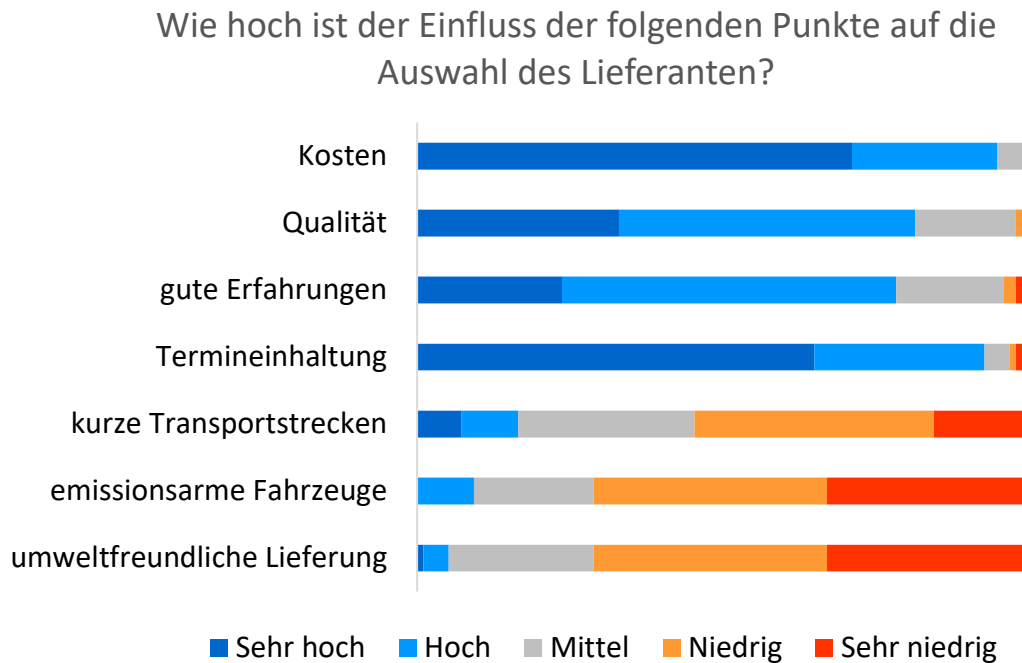


Abbildung 32: Fragen und Auswertung der Umfrage zum Thema Einflüsse auf Wahl des Lieferanten

Hohe oder sehr hohe Einsparpotentiale werden dem Baustellenverkehr (57 %), der Abfallwirtschaft auf Baustellen (50 %), Großbaugeräten (50 %) sowie der Schulung von Personal (38 %) zugeschrieben. Niedrig oder sehr niedrige Einsparpotentiale werden den Kleingeräten (69 %) zugeschrieben. Bei Stromverbrauch (sehr hoch/hoch: 31 % | sehr niedrig/niedrig: 27 %), erneuerbaren Energieträger (29 % | 31 %) und der Verwendung von Ökostrom (35 % | 41 %) waren sich die Befragten scheinbar uneins. Ebenso bei der Frage, ob eine umweltfreundliche Gestaltung des Bauablaufs in der Arbeitsvorbereitung eine Rolle spielt: 26 % meinten „ja“, 33 % meinten „nein“, 41 % meinten „teilweise“. Als Maßnahme, die auf Baustellen bereits umgesetzt wird, wurde nur der hohe Beladungsgrad der Transportfahrzeuge von der Mehrheit der Befragten mit „oft“ oder „immer“ gewählt (53 %). Die Nutzung von Gleisanschlüssen, Wasserstraßen, die Implementierung von Baustelleneinfahrtsgebühren von Transportfahrzeugen, Automatisierte Baustellentransporte (z.B. Förderbänder), Zentrale Koordination der Baustellentransporte sowie die Umstellung der Elektromobilität wurden jeweils von einem Großteil der Befragten mit „selten“ oder „nie“ beantwortet. Als Maßnahmen, die Baustellentransporte reduzieren sollen, wurden zusätzlich Kriterien im Bestbieterverfahren (z.B. Einschränkung des Radius), ausgeklügelte (Material-)logistik (z.B. Vermeidung von Leerfahrten), hoher Vorfertigungsgrad, keine Änderungen in der Ausführungsphase, Materialaufbereitung vor Ort, Wiederverwendung von Aushubmaterial, weniger Erdaushub generell und Lean Management genannt.

## Einsparpotentiale

Wie hoch schätzen Sie die Einsparungspotentiale bei den folgenden Themen ein?

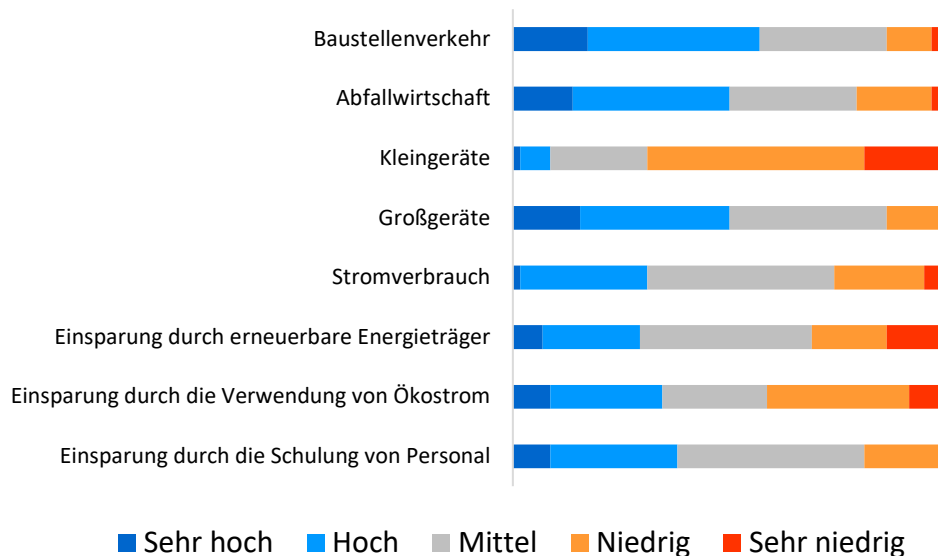


Abbildung 33: Fragen und Auswertung der Umfrage zum Thema Einsparungspotentiale

Das Einsparpotential bei Baugeräten wurde für emissionsarme Motoren (55 %) und Elektroantriebe (57 %) hoch oder sehr hoch eingeschätzt. Bei der Verwendung von Alternativkraftstoffen und integrierten Wartungsplänen waren sich die Befragten, wie in Abbildung 33 ersichtlich, uneins. Umgesetzt werden derzeit davon oft oder sehr oft nur emissionsarme Motoren (72 %), die anderen Maßnahmen selten oder nie. Als weitere Möglichkeiten zur CO<sub>2</sub>-Einsparung von Baugeräten wurde Abschaltautomatik, die Reduktion der Leerlaufzeiten, eine erhöhte Auslastung, Fertigteilbauweise, Mitarbeiter:innenschulung sowie keine Änderungen in der Ausführungsphase identifiziert.

Die Stromerzeugung bauseits mit Aggregaten passiert derzeit laut Befragten zu 76 % oft oder sehr oft. Solarzellen, Windkraft, Kleinkraftwerke oder Biomasse kommen selten oder nie zum Einsatz. Als weitere Möglichkeit zur bauseitigen Stromerzeugung wurde nur Wasserstoff (Blockheizkraftwerk) genannt.

### Ergebnisse des Workshops

Bei der Umfrage während des Workshops wurden die Einsparungen durch organisatorische Maßnahmen besonders für Heizung, Kühlung und Belüftung hoch eingeschätzt (26 Teilnehmer:innen, siehe Abbildung 34). Bei diesem Punkt wurde auch die höchste Einsparung durch technologische Maßnahmen identifiziert (23 Teilnehmer:innen, siehe Abbildung 35), gefolgt von Baustellentransporten und Bauausführung.

## Einschätzung des CO<sub>2</sub>-Verringerungspotentials durch organisatorische Maßnahmen

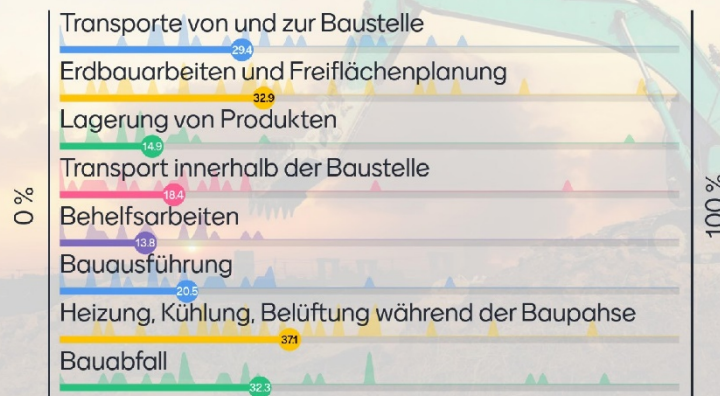


Abbildung 34: Einschätzung des CO<sub>2</sub>-Verringerungspotentials durch organisatorische Maßnahmen im Zuge des Expert:innen-Workshops

## Einschätzung des CO<sub>2</sub>-Verringerungspotentials durch technologische Maßnahmen

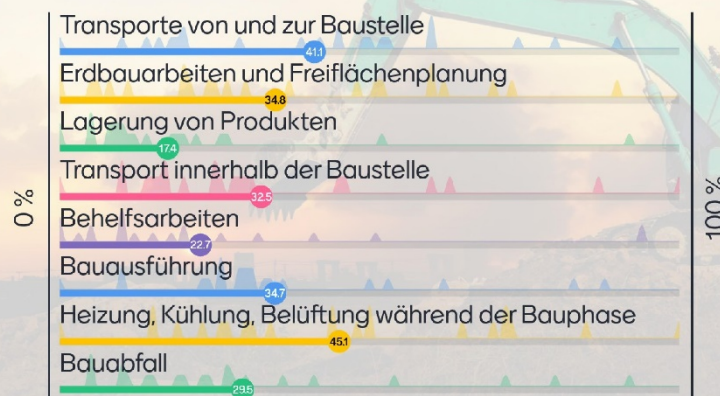


Abbildung 35: Einschätzung des CO<sub>2</sub>-Verringerungspotentials durch technologische Maßnahmen im Zuge des Expert:innen-Workshops

## 5.5. Hemmnisse bei der Umsetzung der CO<sub>2</sub>-freien Baustelle

Einleitend zu diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Expert:innenumfrage zu diesem Thema beschrieben. In den darauffolgenden Kapiteln werden weitere identifizierte Hemmnisse behandelt.

Folgende Hemmnisse zur Umsetzung von umweltfreundlichen Baustellen wurden in der Umfrage überwiegend mit hoch oder sehr hoch bewertet: Kosten (74 %), Termine (50 %), Fehlende Bereitschaft/Interesse (48 %), die Verfügbarkeit von Baugeräten mit alternativen Antriebssystemen (74 %) und die Verfügbarkeit von erneuerbarem Strom (50 %). Gesetze und Vorschriften wurden von den meisten Befragten als niedriges oder sehr niedriges Hemmnis empfunden (45 %), nur 21 % empfanden diese als hohes oder sehr hohes Hemmnis. Als hilfreiche oder sehr hilfreiche Möglichkeiten, die obigen Hemmnisse abzubauen, wurden Förderungen (79 %), Bewusstseinsbildung (58 %) und Änderungen bei Gesetzen und Vorschriften (68 %) genannt. Sonstige Auszeichnungen für umweltfreundlichen Bauablauf, z.B. Urkunden, wurden von 50 % der Befragten als wenig oder gar nicht hilfreich bewertet.

Wie gravierend schätzen Sie folgende Hemmnisse für die Umsetzung umweltfreundlicher Baustellen ein?

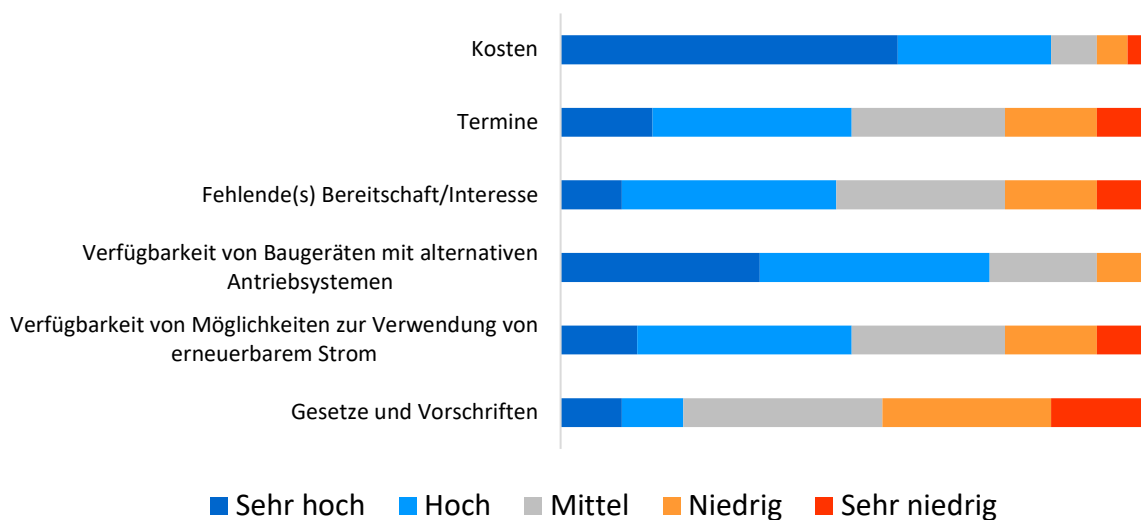


Abbildung 36: Fragen und Auswertung der Umfrage zum Thema Hemmnisse

In der Auswertung der Umfrage wurde evident, dass es an den Rahmenbedingungen scheitert, dass ökologische Kriterien gegenüber ökonomischen Kriterien stark in den Hintergrund gedrängt werden. Die Firmen müssen wettbewerbsfähig bleiben und können oder wollen es sich nicht leisten, Abstriche bei Qualität, Kosten oder Terminen zugunsten der Umwelt bzw. des Klimas zu machen. Expertinnen und Experten in den Workshops/Interviews, besonders Vertreter:innen von Bauunternehmen, geben an, Maßnahmen zur Verringerung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes auf Baustellen würden erst umgesetzt werden, wenn Bauunternehmer:innen entweder vertraglich oder gesetzlich verpflichtet werden oder wenn es ihnen einen ökonomischen Nutzen im Bauprojekt bringt. Wären CO<sub>2</sub>-sparende Maßnahmen gewinnbringend, würden sie also auch vermehrt zum Einsatz kommen.

### **5.5.1. Hemmnisse im Bereich der organisatorischen Maßnahmen**

Die digitalen Technologien zur Optimierung von Bauprojekten sind im Grunde vorhanden. Was fehlt, ist die Dissemination in die Planungs- und Bauunternehmen, damit BIM, Taktplanung und LEAN Management-Methoden in der Praxis in voller Breite umgesetzt werden können. Durch Zeit- und auch Geldeinsparungen durch Optimierungen ist es jedoch wahrscheinlich, dass diese Hemmnisse nur von kurzer Dauer sind, da auch betriebswirtschaftliche Interessen bestehen, den Bauprozess so weit wie möglich zu optimieren. Um diese Hemmnisse zu überwinden, ist eine Ausbildungsoffensive in der Branche notwendig. Lehrlingsausbildungsstätten, HTLs, FHs und Universitäten haben die Themen bereits in Ihre Lehrpläne aufgenommen. Für die große Anzahl an Beschäftigten im Bauwesen ist eine berufsbegleitende Ausbildung naturgemäß wesentlich schwieriger zu bewerkstelligen. Weiters führen in der Praxis die neuen technischen und organisatorischen Methoden zu neuen Herausforderungen an den Schnittstellen, denen nur durch Erfahrung und darauf aufbauende Optimierung begegnet werden kann.

#### **Hemmnisse beim Urban Mining:**

Aufbereitung und Wiederverwendung von mineralischem Abbruch auf Baustellen wird oft durch rechtliche, technische und organisatorische Rahmenbedingung erschwert, z.B. Platzbedarf der Anlagen (Abstandsregeln), Staub- und Lärmbelästigung, Prüfung der Eignung/Zulassung des recycelten Materials, Planung des Bauablaufs, uvm.

### **5.5.2. Hemmnisse im Bereich der technologischen Entwicklungen**

Kabelelektrische Maschinen erfahren eine niedrigere Akzeptanz von den Bauunternehmen und werden sich daher bis auf wenige Ausnahmen, etwa in der stationären Bauindustrie (Rohstoffabbau, Fertigteilerwerke) oder kabelelektrische Kleingeräte, nicht durchsetzen. Es wurde die Erfahrung gemacht, dass Unternehmen bereit sind, zumindest temporär – etwa für die Dauer des Ladevorgangs – am Kabel zu arbeiten. Das Kriterium für kabelelektrische Baumaschinen und Baugeräte ist die elektrische Anschlussleistung, die auf der Baustelle vorhanden ist. Diese ist zumeist ohnehin durch einen etwaig vorhandenen Baukran zu einem guten Teil ausgelastet, der weitere Anschluss von großen elektrischen Baumaschinen könnte sich ohne Anschluss ans Mittelspannungsnetz als schwierig erweisen (Streitz, 2021).

Die Akkutechnik ist noch nicht so weit entwickelt, dass große Maschinen einen Arbeitstag durcharbeiten können. Baumaschinen müssten, um mit der Lebensdauer von dieselbetriebenen Baumaschinen mithalten zu können, um die 2000 bis 2500 Vollladezyklen überstehen. Nach den vorgesehenen Vollladezyklen beträgt die Speicherfähigkeit noch 80 % (die Akkus können dann noch bis ca. 70 % der ursprünglichen Speicherfähigkeit z.B. als Batteriespeicher genutzt werden. Danach ist die Lebensdauer des Akkus zu Ende und eine Weiterverwendung mit Gefahren verbunden (Brand- und Explosionsgefahr) (Streitz, 2021).

Bei mobilen Geräten, die mit Akkus betrieben werden, ist die Batterietechnik der begrenzende Faktor für die Einsatzfähigkeit. Die Kosten für große Akkus sind derzeit noch sehr hoch, weswegen sich die Elektrifizierung von Baumaschinen derzeit auf kleine Maschinen bis ca. 5-8 Tonnen beschränkt. Bei Standgeräten, die kabelelektrisch betrieben werden, ist die elektrische Anschlussleistung auf der Baustelle ein nicht zu unterschätzender Faktor (Streitz, 2021).

Eines der größten Hemmnisse von elektrischen Baumaschinen stellen laut der Expert:innenumfrage die Kosten dar. Hier befindet sich die Branche derzeit in einer spannenden Phase, weil die Lebenszykluskosten für einige elektrische Geräte jene für vergleichbare Dieselgeräte zu unterbieten beginnen. Dies geschieht durch den günstigeren Strompreis im Vergleich zum Diesel und den geringen Aufschlag für die elektrische Variante, der für Minibagger zum Teil nur mehr ca. +20 bis + 30 % beträgt. Wie sich das auf die Whole-life-costs auswirkt, ist detailliert in Kapitel 5.3.1 beschrieben.

Wasserstoff kommt derzeit aufgrund der deutlich höheren Kosten im Vergleich zu dieselbetriebenen Kraftstoffen oder zur Elektrizität (noch) nicht zum Einsatz. Dies beruht auch auf dem geringen Wirkungsgrad bei der Herstellung durch den hohen Einsatz von elektrischem Strom (Elektrolyse). Eine Möglichkeit für die Erzeugung von (grünem) Wasserstoff ist, diese zum Beispiel nach Nordafrika zu verlegen und durch den Einsatz von Solarenergie herzustellen.

Bei Biodiesel ist die Technologie zur Herstellung vorhanden und recht gut ausgereift, die Motorenhersteller sind derzeit aber noch dabei, den reinen Biodiesel (HVO100) freizugeben. Das Risiko eines Motorschadens wäre somit gänzlich auf Seiten des Anwenders, was von diesen i.d.R. nicht akzeptiert werden kann. Ein weiteres Hemmnis ist die begrenzte Ackerfläche für den Anbau der benötigten Pflanzen und in dem Zusammenhang die direkte Konkurrenz mit der Agrarindustrie (insbesondere der Lebensmittelindustrie) und Holzindustrie (Streitz, 2021).

Die Hemmnisse für E-Fuels sind zweierlei. Einerseits sind herkömmliche Dieselmotoren nicht 100 % mit reinen E-Fuels kompatibel (sie können jedoch mit wenig Aufwand modifiziert werden, um es zu sein), andererseits ist der Preis für E-Fuels (ca. 4,50 €/Liter Oxymethylenether bei einer niedrigeren Energiedichte im Vergleich zu Diesel) derzeit nicht wettbewerbsfähig. Wie am Anfang des Kapitels beschrieben, sind die Kosten für diese Maßnahme das größte Hemmnis. Ein weiterer Punkt ist der hohe Energieverlust beim Einsatz von elektrischem Strom zur Erzeugung der Kraftstoffe. Ähnlich wie beim Wasserstoffantrieb müsste der zur Erzeugung verwendete Strom aus nachhaltigen Quellen stammen, um überhaupt eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen zu bewirken.

Den größten Anteil der Emissionen in der Bauphase machen in der Regel die Transporte der Baustoffe, Abfälle, Aushubmaterialien und Baurestmassen aus. Soll der Schwerverkehr elektrifiziert werden, so wären neue Lösungen in der Batterietechnik (Stichwort: Reichweite!) oder in der Logistik notwendig. Stark frequentierte Strecken könnten mit Oberleitungen versehen werden (Schuster, 2021). Auch die Idee von einem austauschbaren Akkusystem könnte weiterverfolgt und umgesetzt werden. Wenn der gesamte Verkehr elektrifiziert werden soll, wären unabhängig vom gewählten System mindestens 15 % mehr Strom notwendig, als derzeit vorhanden ist (Engel, Hensley, Knupfer, & Sahdev, 2018). Um einen nennenswerten Einfluss auf die CO<sub>2</sub>-Bilanz zu haben, müsste dieser Strom außerdem aus nachhaltigen Quellen stammen.

### **5.5.3. Hemmnisse im Bereich der Erzeugung erneuerbarer Energie auf der Baustelle**

#### **Planung und Ausführung**

Die Erhebung des Bedarfs, die Dimensionierung der Anlagen, die Wahl der geeigneten Standorte bzw. Flächen, die Anschluss-, Einspeise- und Speichermöglichkeiten etc. müssen je Baustelle individuell und frühzeitig in der Planungsphase erfolgen. Zudem wird geschultes Personal benötigt, um die Anlagen entsprechend zu installieren. Die Verschmutzung von PV-Paneelen durch

Baustellenstaub führt je nach Dicke der Schmutzschicht zu einem geminderten Wirkungsgrad. Diesem Problem kann durch regelmäßige Reinigung und bei PV-Folien durch vertikale Anbringung entgegengewirkt werden (Quelle: mündliche Auskunft der Fa. Green Lemon und Crystalsol). Bei Windkraftanlagen muss bei der Wahl der Anlage und des Aufstellungsortes bzw. -höhe auf die dort vorherrschenden Strömungsgeschwindigkeiten geachtet werden, um optimale Erträge zu erzielen (mündliche Auskunft der Fa. Conversio Austria).

### **Ökonomie**

Um die Kosten möglichst niedrig zu halten, bedarf es einer gewissen Standardisierung sowie System- bzw. Modullösungen, die mehrfach auf verschiedenen Baustellen verwendet werden können. Gerade auf innerstädtischen Baustellen mit geringen Platzverhältnissen stellt dies eine große Herausforderung dar. Auch die Einsatzdauer der Anlagen auf einer Baustelle hat wesentlichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit.

### **Logistik**

Der Aufwand für die Manipulation der Anlagen stellt für manche Bauunternehmen ein Hemmnis dar. Durch den vermehrten Transport von PV-Anlagen und Kleinwindkraftanlagen kann es zur Beschädigung der PV-Fläche oder der Windräder kommen.

### **Speichermöglichkeiten**

Um den erzeugten Strom möglichst effizient auf der Baustelle nutzen zu können, bedarf es Speichermöglichkeiten. Während Batterien v.a. hohe Kosten verursachen, sind die infrastrukturellen, rechtlichen Rahmenbedingungen für Anschluss- und Einspeisemöglichkeiten in das Stromnetz oft nicht gegeben.

### **Rechtliche Rahmenbedingungen**

Für das Aufstellen von Kleinwindrädern sind Genehmigungen einzuholen, die je nach Bundesland unterschiedlich sind.

### **Ökologie**

Ob die Produktion von Strom auf der Baustelle gegenüber dem Zukauf von „Grünen Strom“ zu bevorzugen ist, hängt von den individuellen Rahmenbedingungen (vorhandene Infrastruktur, Strombedarf, Bauzeit, Speicherbedarf, Wiederverwendbarkeit der Komponenten, etc.) je Baustelle ab. In dieser Arbeit wird nur die Wirkkategorie GWP (Global Warming Potential) betrachtet. Für eine umfassendere ökologische Betrachtung müssten mehrere Wirkkategorien sowie Aspekte der Ökologie (Ressourceneffizienz, Kreislaufwirtschaft, ...) untersucht werden.

## **5.5.4. Hemmnisse im Bereich des Zukaufs erneuerbarer Energie (Strom)**

### **Lokal vorhandenes Stromnetz entspricht nicht dem Bedarf der Baustelle**

Das bei Baustellen vorhandene lokale Stromnetz kann oft nicht den nötigen Bedarf an Stromleistung liefern. Um hier Lösung herbeizuführen, muss rechtzeitig vor Baubeginn der Bedarf erhoben werden und beim zuständigen Netzbetreiber ein Ansuchen um entsprechende Versorgung gestellt werden. Diese müssen dann gegebenenfalls das Netz verstärken. Gelingt das nicht rechtzeitig, so werden oft Dieselgeneratoren zur Off-Grid-Stromerzeugung eingesetzt.



## **Organisatorische Hindernisse beim Stromanbieterwechsel in der Bauphase**

Der Baustrom wird üblicherweise vom Bauwerber, der Bauwerberin oder vom ausführenden Bauunternehmen (Bauführer) bezogen. Die Bauunternehmen haben meist laufende Verträge für Baustrom bei den entsprechenden lokalen Energieversorgungsunternehmen (EVU). Ein Anbieterwechsel würde einen erhöhten organisatorischen Aufwand bedeuten, der auch mit zeitlichen Verzögerungen und eventuellen Mehrkosten verbunden wäre.

### **5.5.5. Hemmnisse im Bereich der CO<sub>2</sub>-Kompensation**

Je nach Programm können CO<sub>2</sub>-Kompensationspreise günstig sein. Dann stellt der Preis keine große Hürde auf den Weg zur CO<sub>2</sub> neutralen Baustelle dar. An dieser Stelle wird wiederholt, dass einige Anbieter eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen vor Kompensation fordern. Bei Anbietern mit Projekten, die höhere Kompensationskosten haben, kann auch der Preis ein Hemmnis darstellen.

## **5.6. Leitfaden zur Verringerung der THG-Emissionen auf Baustellen**

Die Möglichkeiten, spezifische Einsparmaßnahmen zu planen, umzusetzen und zu quantifizieren, hängen stark von den zur Verfügung stehenden Daten bzw. vom Einflussbereich der beteiligten Akteur:innen ab. Im folgenden Leitfaden werden die wesentlichen Möglichkeiten zur Verringerung der THG-Emissionen auf Baustellen schematisch und hierarchisch dargestellt. Dieser Leitfaden bietet eine Anleitung zur Datenerfassung als Basis für eine grobe Abschätzung der THG-Emissionen und deren Einsparungen. Für weitere Informationen wird auf die jeweiligen Punkte im Bericht verwiesen.

Die Datenerhebung ist zu trennen in:

- Transportprozesse und
- Prozesse vor Ort (Baustellenaktivitäten).

### **5.6.1. Transportprozesse**

Die in diesem Bericht definierten Indikatoren zu Verringerung der Emissionen bei den Transportprozessen sind (siehe auch Punkte 4.8.1):

- Verringerung der zu **transportierenden Massen [t]**
- Verringerung der **Transportdistanzen [km]**
- Einsatz von **Transportmittel** mit geringeren THG-Emissionen [kg CO<sub>2</sub>-equ/tkm]

Um spezifische Einsparungen quantifizieren zu können, müssen die oben genannten Daten zumindest nach folgenden Transportmitteln bzw. Energieträgern unterteilt werden:

- LKW – Diesel (wenn möglich nach Größe und Euroklassen)
- Transportmittel sonstige

Die Umsetzung konkreter Maßnahmen kann nach dem Stufenplan erfolgen (siehe Kapitel 4.7). So können z.B. durch die Wahl eines näheren Produzenten, durch die Wiederverwendung von Aushub oder vor Ort aufbereiteten Beton Transportkilometer gespart werden, was zur Verringerung der THG-Emissionen führen würde. Werden einige Transporte anstelle von dieselbetriebenen LKW mit dem Zug (Strom) durchgeführt, so ist für die betreffenden Kilometer eine weitere Verringerung der THG-Emissionen möglich.

Alternativ zu dieser Erhebung kann eine sehr grobe Abschätzung auch über den gesamten Treibstoff-Verbrauch beim Transport erfolgen. Der Indikator wäre dann die Vermeidung von Treibstoff. Vorschläge für Maßnahmen siehe Kapitel 4.7.

### 5.6.2. Prozesse vor Ort (Baustellenaktivitäten)

Die in diesem Bericht definierten Indikatoren zu Verringerung der Emissionen bei den Baustellenaktivitäten sind (siehe auch Punkte 4.8.1):

- 1. Verringerung des **Verbrauchs der Baugeräte** [l/h], [MJ/h], [kWh/h], ...
- 2. Verringerung der **Betriebsstunden der Baugeräte** [h]
- 3. Einsatz von Geräten mit geringeren THG-Emissionen je Verbrauch [kg CO<sub>2</sub>-eq/MJ], [kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh], ...

Um spezifische Einsparungen quantifizieren zu können, müssen die oben genannten Daten zumindest nach folgenden Energieträgern unterteilt werden:

- Baugerät – Diesel
- Baugerät – Strom
- Baugerät – sonstige

Die Umsetzung konkreter Maßnahmen kann nach dem Stufenplan erfolgen (siehe Kapitel 4.7). So sind z.B. durch die Reduktion der Stillstandzeiten und durch verbesserte Logistikkonzepte Einsparungen möglich. Für die Quantifizierung spezifischer Einsparungen bei einzelnen Baumaschinen, wie z.B. durch Ersatz von dieselbetriebenen Baggern durch Hybrid oder E-Bagger, bedarf es aber auch spezifischer Daten der einzelnen Verbraucher. Der gesamte Strombedarf ist meist einfacher abzuschätzen (Baustromzähler-Auswertungen von vergleichbaren Baustellen) als der gesamte Dieserverbrauch. Zusätzlich besteht beim Strom die Möglichkeit, THG-Emissionen über die Produktion von erneuerbarer Energie auf der Baustelle und über Zukauf von „Grünem Strom“ zu verringern.

Anmerkung: Das hier beschriebene Vorgehen stellt die Basis für die Erstellung grober Sachbilanzen dar. Für die Umrechnung der Sachbilanzen in eine Wirkungsabschätzung sind Institute bzw. Unternehmen mit entsprechenden Kenntnissen hinzuzuziehen.

## 5.7. Beitrag des Projekts zu den Gesamtzielen des Programms „Stadt der Zukunft“

„Das Programm „Stadt der Zukunft“ ist Teil der nationalen Bestrebungen zur Energieforschung und verfolgt folgende strategische Ziele:

- Nachhaltiges Energiesystem
- Reduktion der Klimawirkung
- Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit
- Erhöhung der F&E-Qualität

**Energie und Dekarbonisierung sind die Leitthemen der „Stadt der Zukunft“.** Daher stehen die Orientierung an Energiedienstleistungen, die Steigerung der Energieeffizienz und des Anteils an erneuerbarer Energie im Vordergrund. Faktoren wie lebenswerte Stadt, attraktiver Wirtschaftsstandort oder Grünraumgestaltung sind jedoch ebenfalls zu berücksichtigen.“ (Bodisch, et al., 2019, S. 10)

In der vorliegenden Studie wurden die genannten Ziele in ihrem Aufgabenbereich konsequent verfolgt. So wurden die Potentiale zur Dekarbonisierung von urbanen Baustellen durch Vermeidung von Energiebedarf einerseits und durch Verlagerung auf erneuerbare Energiequellen andererseits ermittelt und anhand vier fiktiver Baustellen konkrete Einsparpotentiale für verschiedene Baustellentypen berechnet. Mehrwerte, wie etwaige Kosten- und Nutzen-Vorteile einer CO<sub>2</sub>-neutralen Baustelle wurden aufgezeigt. Experten und Expertinnen wurden laufend über Interviews, Umfragen und einen Workshop in die Arbeit eingebunden. Dadurch wurde eine Einbettung in die österreichische Bauwirtschaft sichergestellt, was sowohl die F&E-Qualität der Arbeit steigerte als auch die Stakeholder über zukünftige Herausforderungen und den anstehenden Entwicklungsbedarf informierte. Schließlich wurden Empfehlungen für zukünftige Forschungsschwerpunkte unter Einbeziehung der Programmziele der „Stadt der Zukunft“ ausgearbeitet.

# 6 Schlussfolgerungen

## 6.1. Schlussfolgerungen aus der Analyse der vier fiktiven Baustellen

- Reale Daten von Baustellen sind je nach Beteiligten am jeweiligen Bauprozess in unterschiedlicher Qualität und Vollständigkeit vorhanden.
- Da derzeit die Daten für die Berechnung der THG-Emissionen nicht gezielt erhoben werden, müssen diese zeitintensiv nachrecherchiert werden. Mit einer standardisierten Datenerfassung könnte die Datenerhebung verbessert werden.
- Die Systemdefinition in Anlehnung an bestehende Normen hat sich bewährt. Es gab bei den ersten Präsentationen der Ergebnisse keine nennenswerten Einwände. Kleinere noch bestehende Unstimmigkeiten könnten mit einem Partizipationsprozess von mehreren Baubeteiligten gelöst werden.
- Die Baustelle ist Teil des Lebenszyklus eines Gebäudes. Die vorgelagerten Prozesse (z.B. Vorfertigung von Bauteilen) können einen wesentlichen Einfluss auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen auf der Baustelle haben. Dadurch ist ein direkter Vergleich der CO<sub>2</sub>-Emissionen unterschiedlicher Baustellen ohne Berücksichtigung des Gebäudelebenszyklus nur eingeschränkt möglich.
- Die wesentlichen Energieträger für die Baustellenaktivitäten sind Diesel und Strom, das wesentliche Transportmittel ist der LKW.
- Der gesamte Strombedarf lässt sich bei den meisten Baustellen über den Baustromverteiler relativ einfach erheben. Verbrauchsdaten über den gesamten Kraftstoffverbrauch auf der Baustelle zu bekommen, ist hingegen schwieriger. Auch Daten über Transportkilometer und den Kraftstoffverbrauch für den Transport stehen oft nicht in ausreichender Qualität zur Verfügung.
- Die größten Einsparpotentiale liegen bei der Reduktion von Transportdistanzen, alternativen Treibstoffen/Antriebsformen und bei der Produktion (auf der Baustelle) und Zukauf von Strom aus erneuerbaren Quellen.
- Der Transport hat einen wesentlichen Anteil an den CO<sub>2</sub>-Gesamtemissionen des Bauprozesses. Dies gilt sowohl für die Errichtungsphase als auch für die Rückbauphase. Beim Transport (Transportunternehmen, Bauunternehmen) liegt daher auch ein sehr großes CO<sub>2</sub>-Einsparpotential.
- Derzeit ist noch nicht klar, welche alternative Antriebs-Technologie sich bei LKW und Baugeräten durchsetzen wird (E versus H<sub>2</sub>). Diesbezügliche Einsparungen sind daher noch schwer quantifizierbar.
- Je nach Strombedarf auf der Baustelle gibt es ein Potential zu Verringerung der THG-Emissionen durch Deckung des Strombedarf über erneuerbare Energiequellen. Dies kann einerseits über die Erzeugung von erneuerbarem Strom auf der Baustelle selbst, als auch über einen Zukauf von „Grünem Strom“ bewerkstelligt werden. Dabei ist zu beachten, dass das bei Baustellen vorhandene lokale Stromnetz oft nicht den nötigen Bedarf an Stromleistung liefern kann.
- Die Szenarien für 2023 zeigen, dass für alle am Bauprozess beteiligten Akteur:innen bereits genügend Maßnahmen zur Verfügung stehen, um schon kurzfristig CO<sub>2</sub>-Einsparungen umzusetzen.

- Die Höhe der Einsparpotentiale einzelner Maßnahmen ist von vielen Faktoren abhängig. Eine Maßnahme, die bei der Baustelle 1 ein sehr hohes Potential aufweist, kann bei der Baustelle 2 unwesentlich sein. Die spezifischen Maßnahmen können demnach nicht pauschal vorgegeben werden, sondern müssen individuell auf jede Baustelle abgestimmt werden. Tabelle 17 bietet beispielsweise eine Bewertung der kurz- bis mittelfristigen Einsparpotentiale für die vier fiktiven Baustellen dieser Arbeit.
- Die Maßnahmen wurden in der Studie getrennt nach mehreren Bereichen untergliedert, um die Zielgruppen besser zu adressieren und damit die Umsetzung der Maßnahmen zu fördern.
- Kosten, Termindruck, fehlende Bereitschaft und praxistaugliche Alternativen sind die wesentlichen Hemmnisse der Erreichung einer CO<sub>2</sub> neutralen Baustelle. Die Baubranche sieht Fördermaßnahmen, Bewusstseinsbildung und Änderungen bei Gesetzen und Vorschriften als Chance zur Umsetzung.
- Bevor der Schritt zur Kompensation gesetzt wird, sollte zumindest ein Teil der Emissionen eingespart werden. Ein hundertprozentiges Kompensieren würde vom Konsumenten eventuell als „green washing“ bezeichnet werden. Die Autor:innen schlagen für die kommenden 2 bis 3 Jahre einen Effizienzbeitrag von mindestens 20 % vor.
- In dieser Arbeit wurde mit Kompensationskosten von 25 Euro/t CO<sub>2</sub> gerechnet, weil dies ein von Climate Austria genannter Durchschnittswert ist. Die Streuung von Kompensationskosten ist jedoch sehr groß. Sie reichen von rund 10 Euro/t CO<sub>2</sub> bis 100 Euro/t CO<sub>2</sub> und mehr. Das Deutsche Umweltbundesamt hat z.B. Umweltfolgekosten von etwa 640 Euro/t CO<sub>2</sub> errechnet.
- In dieser F&E-Dienstleistung wurde nur die Wirkkategorie GWP betrachtet, also der Fokus auf die Reduktion der Treibhausgase gelegt. Somit besteht die Gefahr, dass andere Umweltaspekte oder Reboundeffekte übersehen werden. Für eine umfassendere Betrachtung der Umweltwirkungen aller vorgeschlagenen Maßnahmen müssen weitere Ökoindikatoren in die Untersuchungen sowie Aspekte der Ökologie (Ressourceneffizienz, Kreislaufwirtschaft, ...) mit einbezogen werden.

Tabelle 17: Anteile der Energieträger und Transportmittel an den jeweiligen Gesamtemissionen der Baustellen, sowie Abschätzung des kurz- bis mittelfristigen Einsparpotentials

	Transport - LKW dieselbetrieben	Baustellenaktivitäten Energieträger Diesel	Baustellenaktivitäten Energieträger Strom
<b>fB1 (Wohnbau, Neubau)</b>			
Anteile Energieträger/ Transportmittel	77 %	9 %	14 %
Kurz- bis mittelfristiges Einsparpotential	hoch	nieder	mittel
<b>fB2 (Wohnbau, Sanierung)</b>			
Anteile Energieträger/ Transportmittel	51 %	9%	40 %
Kurz- bis mittelfristiges Einsparpotential	hoch	nieder	hoch

	Transport - LKW dieselbetrieben	Baustellenaktivitäten Energieträger Diesel	Baustellenaktivitäten Energieträger Strom
<b>fB3 (Tiefbau, Asphaltierungen)</b>			
Anteile Energieträger/ Transportmittel	42 %	57 %	1 %
Kurz- bis mittelfristiges Einsparpotential	mittel	mittel	nieder
<b>fB4 (Hochbau, Abbruch)</b>			
Anteile Energieträger/ Transportmittel	26 %	74 %	0 %
Kurz- bis mittelfristiges Einsparpotential	mittel	mittel	nieder

Das Projektteam plant auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse in den Punkten standardisierte Datenerfassung, Systemdefinition und CO<sub>2</sub>-neutrale Musterbaustellen gemeinsame Folgeaktivitäten. Dabei sollen sowohl organisatorische wie auch technologische Maßnahmen getestet und umgesetzt werden. Wie bei diesem Projekt bereits mit Expert:innen-Interviews, Umfragen und Workshops begonnen, soll die Einbeziehung der Baubranche bei Folgeaktivitäten intensiviert und ausgebaut werden. Dadurch wird einerseits die Qualität und der Praxisbezug der Forschungsarbeiten erhöht und andererseits die Zielgruppen über aktuelle Erkenntnisse informiert. Die Ergebnisse der Studie wurden in der Österreichische Ingenieur- und Architekten Zeitschrift (ÖIAZ) und in der Publikationsreihe „energy innovation austria“ des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie publiziert.

## 6.2. Schlussfolgerungen aus der Investitions-Kostenabschätzung

- Derzeit sind elektrisch betriebene Baumaschinen in ihrer Gesamtheit (noch) teurer als dieselbetriebene.
- Die Angaben zu den Neupreisen elektrischer Baugeräte weichen von Hersteller zu Hersteller und von Gerät zu Gerät ab, die Spannweite beträgt hier von +20 % bis zu + 300 %. Die hohen Unterschiede gibt es aus vielen Gründen. Erstens sind elektrische Baugeräte am Markt noch nicht serienmäßig. Zweitens befinden sie sich derzeit noch in einem Stadium der stetigen und raschen Weiterentwicklung, die Preise sind daher sehr volatil.
- Die wichtigsten Kostentreiber elektrischer Baugeräte sind neben der Anschaffung (höher als bei Dieselgeräten) die Elektrizität zum Antrieb (billiger als Diesel) sowie die Reparaturkosten (niedriger).
- Die Preisentwicklung von Diesel und Strom wird unter dem Aspekt der Klimaziele (Stichwort CO<sub>2</sub>-Steuer) in den kommenden Jahren Schwankungen unterworfen sein, die in der Investitionskostenabschätzung berücksichtigt werden muss. Durch eine direkte Besteuerung von CO<sub>2</sub> wäre die Amortisationszeit des höheren Preises von Elektrogeräten je nach Höhe der Steuer vermutlich deutlich niedriger anzusetzen, als es in der vorliegenden Studie gemacht wurde.

- In Zukunft wird sich - abhängig von der Lebensdauer - trotz höheren Investitionskosten eines Elektrogerätes über den Lebenszyklus durch geringere Kraftstoff-, Wartungs- und Reparaturkosten von Elektrogeräten ein wirtschaftlicher Nutzen ergeben. Je nach Vorhaltezeiten sind heute schon einige elektrisch betriebene Kleinbagger günstiger als dieselbetriebene Geräte. Für Unternehmen stellt eine zeitnahe Umstellung eine Chance auf Wettbewerbsvorteile dar.
- Unter der Voraussetzung, dass die Batterietechnik weitere Fortschritte macht und Elektro-Baumaschinen dadurch erschwinglich werden (Neupreis unter 150 % von vergleichbarer Dieselmachine), wird sich der Einsatz elektrisch betriebener Kleinbagger unter 5 Tonnen sowie der Einsatz kleiner elektrisch betriebener Lader, Dumper, Dozer und Handgeräte in Zukunft finanziell für die Bauunternehmen rechnen.
- Kraftstoffe wie Wasserstoff oder E-Fuels können in Zukunft dazu beitragen, dass Baustellen CO<sub>2</sub>-neutral betrieben werden können. Diese Lösung würde zu einer Bauabwicklung beitragen, die der heute üblichen ähnlich ist.

Alle getroffenen Schlussfolgerungen für die Zukunft sind von der Preisentwicklung elektrischer und wasserstoffbetriebener Baugeräte, des zukünftigen Preisvergleiches zwischen erneuerbaren und nicht erneuerbaren Kraftstoffen und der Einführung einer generellen Steuer auf CO<sub>2</sub>-Emissionen abhängig.

### **6.3. Schlussfolgerungen aus der Expert:innenumfrage und den Expert:innengesprächen**

- Mit einer Teilnahme von beinahe 150 Expert:innen kann das Ergebnis als aussagekräftig und repräsentativ für das Thema CO<sub>2</sub>-neutrale Baustelle angesehen werden.
- Die Teilnehmenden haben bezüglich der Datenerfassung angegeben, dass der Strom Großgeräten leichter zuordenbar ist als Kleingeräten. Der Stromverbrauch ist den einzelnen Gewerken nicht zuordenbar.
- Kleine elektrische Baugeräte sind bereits auf dem Vormarsch. Diesem Umstand wurde bei der Expert:innenbefragung nicht Rechnung getragen. Es kann daraus geschlossen werden, dass elektrische Baumaschinen derzeit erst punktuell implementiert werden.
- Bei vielen handelnden Akteuren besteht ein intrinsischer Antrieb, die CO<sub>2</sub>-Emissionen ihres Unternehmens gering zu halten. Dieses persönliche Interesse steht jedoch im Widerspruch zum wirtschaftlichen Denken und Handeln in einem Unternehmen. So gaben die meisten Befragten an, dass Ihnen Klimaschutz wichtig oder sehr wichtig sei, Klimaschutz von öffentlicher Hand gefördert werden sollte und klimafreundliche Produkte auch etwas mehr kosten dürfen.
- Auf der anderen Seite werden durch unternehmerisches Handeln Kosten, Termine, Qualität und Verlässlichkeit als Faktoren zur Auswahl der Lieferanten genannt. Klimaschutzmaßnahmen bei der Lieferantenauswahl spielen derzeit keine Rolle.
- Das Klima zu schonen und Emissionen zu reduzieren kostet Geld. In jedem Fall müssen Wettbewerbsnachteile einzelner Branchen vermieden werden. Hier besteht nach Meinung der Expert:innen Handlungsbedarf seitens der Politik, einheitliche Regeln für alle Unternehmen zu schaffen oder klimaschonendes Verhalten zu belohnen und zu fördern.

- In der Umfrage war erkennbar, dass ein großes Interesse der Vertreter:innen der Bauindustrie besteht, ob und wann CO<sub>2</sub>-Bepreisungen oder -Begrenzungen realisiert werden könnten.
- Generell kann gesagt werden, dass den Befragten der Schutz des Klimas wichtig ist und sie auch bereit sind, dazu einen Beitrag zu leisten, solange dieser nicht ihr Geschäft schädigt.
- Es sollte bei den zuvor gezogenen Schlussfolgerungen allerdings beachtet werden, dass an der Umfrage eher Personen (Entscheidungsträger:innen mit höherem Bildungsabschluss) teilnahmen, denen Klimaschutz ein Anliegen ist. Die gewonnenen Erkenntnisse der Umfrage auf die Entscheidungsträger:innen der Bauindustrie umzulegen, ist somit möglich, die Ansichten auf die gesamte Branche umzulegen, ist aus Sicht der Autor:innen aus genannten Gründen jedoch unzulässig.



# 7 Ausblick und Empfehlungen

## 7.1. Notwendigen (Weiter-) Entwicklungen zur Umsetzung einer CO<sub>2</sub>-neutralen Baustelle

In dieser Forschungsdienstleistung konnten vier realisierte Baustellen unterschiedlichen Typs und Datenqualität anhand einer an Normen angelehnten Methodik analysiert werden. Diese Untersuchungen lieferten wertvolle Erkenntnisse und zeigte Bandbreiten von baustellenbezogenen Emissionen und realistische Szenarien zur Einsparung dieser auf. Dabei wurde außerdem deutlich, dass in diesem Feld weiterer Forschungs- und Handlungsbedarf besteht.

Die notwendigen Weiterentwicklungen werden in die Ermittlung der THG-Emissionen, notwendige organisatorische und technische Weiterentwicklungen gegliedert.

### 7.1.1. Notwendige (Weiter-) Entwicklungen bei Ermittlung der THG-Emissionen

- Die Grundlagen für die Berechnung der THG-Emissionen von Baustellen sind in der Norm für Nachhaltigkeit von Bauwerken (EN-15978, 2012) geregelt. Diese normbasierte Methodik ist sehr detailliert und umfassend, so enthält sie beispielsweise neben einer THG-Bewertung weitere Wirkkategorien. Es stellt sich die Frage, ob zur Reduktion, Verlagerung und Kompensation von THG-Emissionen auf Baustellen zumindest als erster Schritt ein einfacheres Vorgehen ermöglicht werden sollte. Dazu ist eine standardisierte Datenerfassung zu entwickeln, die es den Baubeteiligten erleichtert, die Größenordnung der THG-Emissionen zu erfassen und Maßnahmen zu deren Reduktion oder Verlagerung zu setzen.
- Es wird empfohlen, diese vereinfachte Möglichkeit übergangsmäßig zu etablieren. Wie eng man sich bei der THG-Berechnung an die Normen anlehnt, bedarf einer Abwägung zwischen Aufwand, Nutzen, Ziel sowie genauem Anwendungsbereich. Die Wahl dieses Mittelwegs bedingt, dass zahlreiche Festlegungen neu getroffen werden müssen, die in den Normen bereits fixiert sind: z.B. die Systemgrenzen, die Prozesse, die Datenbanken und Indikatoren der Wirkkategorien.
- Bei der Weiterentwicklung ist besonders auf den Umstand Rücksicht zu nehmen, dass Umweltproduktdeklarationen und Bauwerksbetrachtungen mehrere bis alle Lebenszyklusphasen eines Produkts bzw. Bauwerks behandeln, während die Baustelle eine Standortanalyse ist. Je nachdem ob es sich bei der Baustelle um einen Neubau, eine Sanierung oder einen Abbruch handelt, werden verschiedenen Phasen des Lebenszyklus berührt. Die Einbettung der einzelnen Baustellen in die Lebenszyklusphasen der Normen muss daher genau überlegt werden. Insbesondere ist darauf zu achten, dass Maßnahmen tatsächlich zu einer Verringerung der THG-Emissionen und nicht nur zu einer Verschiebung in anderen Lebenszyklusphasen eines Bauwerks (Beispiel: Vorfertigung) führen.
- Die Umrechnung der Sachbilanz in die Wirkungsabschätzung erfolgt über die Emissionsfaktoren für die Wirkkategorien (in dieser Arbeit: Global Warming Potential). Je nach Quelle können sie sich auf verschiedene Werte/Einheiten in der Sachbilanz beziehen, mehr oder weniger vor- und nachgelagerte Prozesse berücksichtigen, auf unterschiedlichen Annahmen basieren, etc. und daher zu unterschiedlichen Ergebnissen führen. Bei der

Weiterentwicklung ist darauf zu achten, dass in der Branche möglichst einheitliche Wirkkategorien bzw. Emissionsfaktoren verwendet werden.

- Beim Transport wurde in dieser Arbeit mit Emissionsfaktoren auf Basis der Einheit Tonnenkilometers [ton\*km] gerechnet. Treibstoffverbrauch und Emissionen beziehen sich auf durchschnittliche europäische Fahrten und Beladungsfaktoren. Da der Transport einen wesentlichen Anteil an den Gesamt-Emissionen in der Errichtungsphase hat, wird empfohlen, diese Berechnungsmethode einer Analyse zu unterziehen. Dazu wären eine größere Anzahl von Baustellen erforderlich, um einen repräsentativen Wert für die Baubranche zu ermitteln.
- Es besteht Bedarf, bei etablierten wie auch neuen Technologien die entstehenden THG-Emissionswerte zu ermitteln.

### **7.1.2. Notwendige organisatorische (Weiter-) Entwicklungen**

- Flächendeckende Implementierung von LEAN-Management unter Zuhilfenahme digitaler Organisations- und Dokumentationssysteme in der Baubranche.
- Einsatz digitaler Bauwerksmodelle sollte in der Bauausführung forciert werden, um weitere Transparenz zu schaffen und Redundanzen in der Organisation abzubauen. Die damit verknüpften Tätigkeiten werden unter dem Begriff „BIM in der Bauausführung“ subsummiert. Notwendige Entwicklungen sind in der Planung bereits vorangetrieben, sollten jedoch in Zukunft im Einklang mit Nachhaltigkeitsaspekten bis in die Ausführungsphase weiterentwickelt werden.
- Schaffung und Betreuung von Datenbanken mit gewerkespezifischen Emissionskennwerten, die mit den digitalen Bauwerksmodellen verknüpft werden können.
- Implementierung eines Klimaverträglichkeitsbeauftragten auf der Baustelle. Dieser hat die Aufgabe, Emissionseinsparungspotentiale im täglichen Baustellengeschehen zu erfassen und zu nutzen und das Baustellenpersonal hinsichtlich der Maßnahmen zu sensibilisieren. Unter diesen Potentialen werden Maßnahmen verstanden, die in der Kosten-Nutzen-Analyse eine günstige oder neutrale Wirkung erzielen. Verstärkte Implementierung klimaverträglicher Maßnahmen im Zuge des Vergabeverfahrens nach dem Bestbieterprinzip.

### **7.1.3. Notwendige technische (Weiter-) Entwicklungen**

- Da der Transport einen wesentlichen Beitrag zu den THG-Emissionen auf Baustellen liefert, ist die Entwicklung von LKWs, die elektrisch oder mit alternativen Kraftstoffen betrieben werden, prioritär einzustufen.

#### **Elektrischer Antrieb**

- Entwicklung und serienmäßige Herstellung baustellentauglicher Batterietechnik für kabellose elektrisch betriebene Baumaschinen.
- Erhöhung der Anschlussleistung auf Baustellen zur Versorgung von elektrifizierten Baugeräten.
- Serienmäßige Bereitstellung kostengünstiger Batteriespeicher in der Baustelleneinrichtung zur Abdeckung von Leistungsspitzen (Peakshaving).
- Einrichtung von Schnellladestationen oder Entwicklung eines praktikablen Systems des Akku-Tausches zur praxistauglichen Verwendung von batteriebetriebenen Klein- und Großbaugeräten sowie LKWs.

## **Verbrennungskraftstoffe**

- Massiver Ausbau der Erzeugung erneuerbarer Energie zum Betrieb von elektrisch betriebenen Maschinen sowie zur weiteren Produktion von E-Fuels und Wasserstoff.
- Effiziente Erzeugung erneuerbarer Kraftstoffe für den Betrieb kraftstoffbetriebener Baugeräte bis zum Ende deren Lebensdauer und als Nischenlösung für entlegene Baustellen.
- Koppelung der Erzeugung von Power-to-X-Kraftstoffen an die Erzeugung erneuerbarer Energie.
- Das Potenzial von Bio-Kraftstoffen erscheint aufgrund ihres niedrigen Gesamtwirkungsgrades und der zu ihrer Erzeugung verfügbar stehenden Flächen begrenzt.
- Entwicklung und Verwendung von Motoren, die sowohl mit herkömmlichen Kraftstoffen, Biokraftstoffen als auch E-Fuels betrieben werden können.

## **CO<sub>2</sub>-neutrale Baustelle**

- Entwicklung von modulartigen und effizienten Energieerzeugungs- und Speicherungssystemen, die im Zuge der Baustelleneinrichtung montiert und bei der Bauausführung betrieben werden können. Denkbar wären hier z.B. eine modulare PV-Bedachung von Baustellencontainern oder PV-Folien zum Bespannen von Baugerüsten.
- Es besteht Einsparpotential durch effizientere Aufbringung der Energie, z.B. bei Baucontainern (Heizung, Klimatisierung), effizientere Beleuchtungssysteme und effizientere Bauverfahren.

## **7.2. Weiterer Forschungsbedarf zur Realisierung der CO<sub>2</sub>-neutralen Baustelle**

- Entwicklung einer standardisierten Datenerfassung zur vereinfachten Berechnung der THG-Emissionen, die es den Baubeteiligten erleichtert, die Größenordnung der THG-Emissionen zu erfassen und Maßnahmen zu deren Reduktion oder Verlagerung zu setzen. Dazu sollen mehrere reale Baustellen unterschiedlicher Art und Größe aus dem Hoch- und Tiefbau begleitet und eine Datenerhebung bzw. Messbegleitung durchgeführt werden.
- Die fiktiven Baustellen zu realen CO<sub>2</sub>-neutralen Baustellen (Demonstrationsprojekte) überführen. In mehreren Demonstrationsprojekten sollen möglichst viele organisatorische und technische Maßnahmen in der Realität (Feldforschung) getestet und damit die im gegenständlichen Forschungsbericht dargestellten Ergebnisse verifiziert werden (LEAN Management, PV am Bau, Mitarbeiterschulung, E-Effizienter Baucontainer, Kabelgebundene Baumaschinen, Bahn statt LKW-Transport, E-Baugeräte, etc.).
- Holistisches, digitales Datenerhebungsverfahren für die Berechnung von baustellenbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen – auch in Hinblick auf eine potenzielle CO<sub>2</sub>-Taxation – festlegen.
- Einheitliche Berechnungsmethode für den Emissionsausweis für Baustellen entwickeln.
- Kostenwahrheit neuer Technologien anhand realer Ausführungsbeispiele betrachten.
- Synergieeffekte zwischen Emissionseinsparungsmaßnahmen, Digitalisierung und Baubetrieb als Chance für einen ökoeffizienten Bauablauf erheben.
- Praxistauglichkeit neuartiger Baumaschinen und Bauverfahren im interdisziplinären Umfeld mit Hersteller:innen, Bauunternehmer:innen und Anwender:innen mit Hilfe von Expert:innen-Interviews erfassen; Messungen durchführen.

- Qualifizierungsseminare für Auftraggebende und Bauunternehmen zur Sensibilisierung der Rolle der Bauwirtschaft als Beitrag zum Klimaschutz erstellen und durchführen.
- Maßnahmenkatalog für planende und ausführende Unternehmen zur Unterstützung der Umsetzung CO<sub>2</sub>-neutraler Baustellenführung.
- Umsetzbarkeit CO<sub>2</sub>-neutraler Baustellenführung im internationalen Kontext.

# 8 Verzeichnisse

## 8.1. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Anzeige modularer Informationen für die verschiedenen Lebenszyklusstadien des Gebäudes (EN-15978, 2012, S. 23).....	20
Abbildung 2: System Neubau .....	22
Abbildung 3: Systemgrenze Herstellungs- und Errichtungsphase anhand des Beispiels Elektriker/HKLS und Fensterbauer .....	24
Abbildung 4: Systemgrenze Herstellungs- und Errichtungsphase anhand des Beispiels der Betonherstellung.....	25
Abbildung 5: Ausschnitt aus dem Arbeitsblatt „Transport“ des Excel-Tools - Symbolbild .....	27
Abbildung 6: Ausschnitt aus dem Arbeitsblatt "Prozesse vor Ort" des Excel-Tools - Symbolbild .....	27
Abbildung 7: Ausschnitt aus dem Arbeitsblatt "Energieproduktion" des Excel-Tools - Symbolbild .....	28
Abbildung 8: Ausschnitt aus dem Arbeitsblatt "Zusammenfassung" des Excel-Tools - Symbolbild .....	29
Abbildung 9: Methodik des Flussdiagramms zur Investitionskostenabschätzung.....	39
Abbildung 10: Beispiel für Fragestellung mithilfe der Likert-Skala. Der rote Asterisk markiert, dass es sich um eine Pflichtfrage handelt.....	43
Abbildung 11: Verringerung von THG-Emissionen durch Vermeidung und Verlagerung.....	44
Abbildung 12: Stufenplan zur Verringerung der THG-Emissionen.....	45
Abbildung 13: Übersicht über erneuerbare Antriebe .....	53
Abbildung 14: Vorgangsweise bei der Definition der Szenarien.....	66
Abbildung 15: fB1 - THG-Emissionen Ausgangssituation (IST) nach Prozessen .....	71
Abbildung 16: fB1 - THG-Emissionen IST nach Energieträger bzw. Transportmittel .....	72
Abbildung 17: fB1 - Strombedarf nach Monaten .....	73
Abbildung 18: Anteile von THG-Emissionen an Lebenszyklusphasen A1 bis 4 am Beispiel fB1.....	73
Abbildung 19: fB2 - THG-Emissionen Ausgangssituation (IST) nach Prozessen .....	74
Abbildung 20: fB2 - THG-Emissionen IST nach Energieträger bzw. Transportmittel .....	75
Abbildung 21: fB3 - THG-Emissionen Ausgangssituation (IST) nach Prozessen .....	76
Abbildung 22: fB3 - THG-Emissionen IST nach Energieträger bzw. Transportmittel .....	77
Abbildung 23: fB4 - THG-Emissionen Ausgangssituation (IST) nach Prozessen .....	78
Abbildung 24: fB4 - THG-Emissionen IST nach Energieträger bzw. Transportmittel .....	79
Abbildung 25: Szenario 2023 der fB1.....	80
Abbildung 26: Szenario 2023 der fB2.....	81
Abbildung 27: Szenario 2023 der fB3 .....	82
Abbildung 28: Szenario 2023 der fB4 .....	82
Abbildung 29: Flussdiagramm mit konkreten Handlungsempfehlungen zu Investitionen.....	83

Abbildung 30: Übersicht über Kosten/Nutzen-Relation der Maßnahmen bzw. der Kompensationsmaßnahmen und Strafzahlungen durch Zertifikatkauf. Negative Werte bedeuten finanzielle Vorteile zusätzlich zu CO <sub>2</sub> -Einsparungen .....	86
Abbildung 31: Fragen und Auswertung der Umfrage zum Thema Kraftstoffverbrauch .....	87
Abbildung 32: Fragen und Auswertung der Umfrage zum Thema Einflüsse auf Wahl des Lieferanten	88
Abbildung 33: Fragen und Auswertung der Umfrage zum Thema Einsparungspotentiale .....	89
Abbildung 34: Einschätzung des CO <sub>2</sub> -Verringerungspotentials durch organisatorische Maßnahmen im Zuge des Expert:innen-Workshops .....	90
Abbildung 35: Einschätzung des CO <sub>2</sub> -Verringerungspotentials durch technologische Maßnahmen im Zuge des Expert:innen-Workshops .....	90
Abbildung 36: Fragen und Auswertung der Umfrage zum Thema Hemmnisse.....	91

## 8.2. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Preise für E-Baugeräte im Vergleich zu jeweiligem fossil-betriebenen Pendant .....	41
Tabelle 2: Beispiel für den Aufbau einer Maßnahmenmatrix .....	46
Tabelle 3: Matrix für Reduktionsmaßnahmen: organisatorische Maßnahmen – terminliche Maßnahmen .....	48
Tabelle 4: Matrix für Reduktionsmaßnahmen: Transporte und Baustellentransporte .....	49
Tabelle 5: Matrix für Reduktionsmaßnahmen: Abfallwirtschaft.....	51
Tabelle 6: Ergebnisse Szenarien-Berechnungen Aufbereitung mineralischen Abbruchs .....	52
Tabelle 7: Matrix für Reduktionsmaßnahmen: Technologische Entwicklung - Maschinen und Geräte	55
Tabelle 8: Matrix für Reduktionsmaßnahmen: Bauverfahren .....	56
Tabelle 9: Matrix für Reduktionsmaßnahmen: Heizen und Kühlen .....	57
Tabelle 10: Eckdaten von PV-Anlagen (Quellen: Interviews mit (Zechmeister, 2021), (Ammer, 2021), (Ogris, 2021), (Kantner, 2021), (Madel, kein Datum) (Solaranlage Ratgeber - Photovoltaik und Solarthermie Anlagen, kein Datum)).....	59
Tabelle 11: Eckdaten von Windkraftanlagen und Batterie-Speicher (Quellen: (Lafenthaler, 2021), (Jüttemann, kein Datum) (Energiespeicher-Online GmbH, kein Datum)).....	60
Tabelle 12: Matrix für Reduktionsmaßnahmen: Stromerzeugung.....	61
Tabelle 13: Übersicht der sechs höchstbewerteten Anbieter von CO <sub>2</sub> -Kompensationszahlungen im deutschsprachigen Raum .....	64
Tabelle 14: Indikatoren für die Verringerung der THG-Emissionen im Transport .....	67
Tabelle 15: Indikatoren für die Verringerung der THG-Emissionen bei den Prozessen vor Ort .....	67
Tabelle 16: Lebenszykluskostenabschätzung für Elektrobagger im Vergleich zu vergleichbaren Dieseldiggern für verschiedene Baggergrößen und deren Anschaffungspreise (im Vergleich zum jeweils korrelierenden Dieselpendant) in Abhängigkeit der Vorhaltejahre.....	85
Tabelle 17: Anteile der Energieträger und Transportmittel an den jeweiligen Gesamtemissionen der Baustellen, sowie Abschätzung des kurz- bis mittelfristigen Einsparpotentials .....	99

### 8.3. Literatur- und Webquellenverzeichnis

- Ammer, P. (24. 03 2021). Erneuerbare Energie - PV-Zelle. (RMA, Interviewer)
- Ausfelder, F., & Wagemann, K. (2020). Power-to-Fuels: E-Fuels as an Important Option for a Climate-Friendly Mobility of the Future. *Chemie Ingenieur Technik* 92.1-2, S. 21 - 30.
- Barbosa, F., Woetzel, J., Mischke, J., Riberininho, M., Sridhar, M., Parsons, M., . . . Brown, S. (2017). *Reinventing construction through a productivity revolution*. McKinsey Global Institute.
- Benajes, J., Garcíá, A., Monsalve-Serrano, J., & Martínez-Boggio, S. (Juni 2020). Potential of using OME<sub>x</sub> as substitute of diesel in the dual-fuel combustion mode to reduce the global CO<sub>2</sub> emissions. *Transportation Engineering, Volume 1*.
- Berninghausen, C. (November 2019). Synthetische Kraftstoffe – Energieträger der Zukunft? (ADAC, Interviewer) Von <https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/alternative-antriebe/synthetische-kraftstoffe/> abgerufen
- BMK. (2020). *Förderungsrichtlinien 2015 für die Umweltförderung im Inland*. Wien: Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie. Abgerufen am 30. August 2021, 12:45 von [https://www.umweltfoerderung.at/fileadmin/user\\_upload/media/umweltfoerderung/Uebergeordnete\\_Dokumente/frl\\_ufi.pdf](https://www.umweltfoerderung.at/fileadmin/user_upload/media/umweltfoerderung/Uebergeordnete_Dokumente/frl_ufi.pdf)
- BMNT und BMVIT. (2018). *mission 2030 - Die österreichische Klima- und Energiestrategie*. Wien: Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie.
- Bodisch, U., Bolovich, K., Ganglberger, E., Hantsch-Linhart, W., Herber, E., Hübner, M., . . . Zillner, T. (2019). *Stadt der Zukunft - Auf dem Weg zum Plus-Energie-Quartier, 7. Ausschreibung*. Wien: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT).
- Bünger, B., & Matthey, A. (2018). *Methodenkonvention 3.0 zur Ermittlung von Umweltkosten - Methodische Grundlagen*. Deutschland: Umweltbundesamt. Abgerufen am 30. August 2021, 11:15 von <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/methodenkonvention-30-zur-ermittlung-von-0>
- Climate Agency, City of Oslo. (2018). *Emission-reduction potential of fossil- and emission-free building and construction sites*. Oslo.
- Committee for European Construction Equipment and CEMA European Agricultural Machinery CECE. (2018). *Optimising our industry 2 reduce emissions*. Brussels.
- Damyanov, A., Hofmann, P., Geringer, B., Schwaiger, N., Pichler, T., & Siebenhofer, M. (2018). Biogenous Ethers: Production and Operation in a Diesel Engine. *Automotive and Engine Technology: The International Journal of WKM* 2018 - 3, S. 69 - 82.
- Diakonie ACT Austria gem. GmbH - Klima-Kollekte. (2018). *klima-kollekte.at*. Abgerufen am 30. August 2021, 13:25 von <https://klima-kollekte.at/>
- Ecoinvent. (2019). *Datenbank 3.6*. Abgerufen am 12. Juli 2021, 08:45 von <https://www.ecoinvent.org/login-databases.html>

- EEC Energy and Environmental Consulting GmbH. (kein Datum). [www.eecaustria.at/co2-kompensation](http://www.eecaustria.at/co2-kompensation). Abgerufen am 30. August 2021, 12:50 von <https://www.eecaustria.at/co2-kompensation.html>
- EEC Energy and Environmental Consulting GmbH. (kein Datum). [www.eecaustria.at/klimaschutzprojekte.html](http://www.eecaustria.at/klimaschutzprojekte.html). Abgerufen am 30. August 2021, 13:00 von <https://www.eecaustria.at/klimaschutzprojekte.html>
- Ely, H. (11.. April 2021). *finanzen.net*. Abgerufen am 08.. Juli 2021, 16:00 von <https://www.stadt-wien.at/lifestyle/alternative-mobilitaet/elektroauto-preise-und-kosten.html>
- EN-15804. (2020). ÖNORM EN 15804:2012+A2:2019-10: Nachhaltigkeit von Bauwerken — Umweltprodukt-deklarationen — Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte, Ausgabe: 2020-02-15.
- EN-15978. (2012). ÖNORM EN 15978:2011: Nachhaltigkeit von Bauwerken — Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden — Berechnungsmethode, Ausgabe 2012-10-01.
- Energie-Control Austria. (2016). *Ökostrombericht 2016*. Wien: Web.
- Energiespeicher-Online GmbH. (kein Datum). Abgerufen am 16. September 2021, 11:00 von <https://www.energiespeicher-online.shop/energiespeicher/>
- Energy Norway. (2018). *Guide to arrange fossil- and emission-free solutions on building sites*. Oslo.
- Energy3000-solar-GmbH. (25. 03 2021). Erneuerbare Energie - PV-Zelle. (RMA, Interviewer)
- Engel, H., Hensley, R., Knupfer, S., & Sahdev, S. (2018). *The potential impact of electric vehicles on global energy systems*. McKinsey & Company.
- EN-ISO-14040. (2009). ÖNORM EN ISO 14040:2006: Umweltmanagement — Ökobilanz — Grundsätze und Rahmenbedingungen, Ausgabe: 2009-11-01.
- EN-ISO-14044. (2018). ÖNORM EN ISO 14044:2006 + A1:2018: Umweltmanagement — Ökobilanz — Anforderungen und Anleitungen, Ausgabe: 2018-06-15.
- EN-ISO-14067. (2019). ÖNORM EN ISO 14067:2018 - Greenhouse gases — Carbon footprint of products — Requirements and guidelines for quantification, Ausgabe: 2019-03-15.
- Enzian, F. (26.. Mai 2021). *MAN Truck & Bus*. Abgerufen am 05.. Juli 2021, 16:30 von <https://www.mantruckandbus.com/de/innovation/wasserstoff-meets-lkw-man-baut-erste-prototypen.html>
- EPD-Plattform. (2018). *Produktkategorieregeln für gebäudebezogene Produkte und Dienstleistungen, PKR-Teil A, 16. April 2018*. Wien: Österreichische EPD-Plattform für Bauprodukte.
- ETAPART. (2021). *Containerheizung*. Abgerufen am 06.. Juli 2021, 10:00 von <https://www.etapart.com/de/wissen/anwendungsbereiche/containerheizung>
- Fiedler, M. (2018). *Lean Construction - Das Managementhandbuch*. Berlin: Springer Verlag.
- Goger, G., Piskernik, M., & Urban, H. (2017). *Studie Potenziale der Digitalisierung im Bauwesen*. Wien: BMVIT und WKO.
- Grabitz, M. (21.. Juni 2021). Rechenfehler bei CO2-Bilanz von E-Autos? *Stuttgarter Zeitung Nr. 139*.



- Härtl, M., Gaukel, K., Pélerin, D., & Wachtmeister, G. (2017). Oxymethylenether als potenziell CO<sub>2</sub>-neutraler Kraftstoff für saubere Dieselmotoren Teil 1: Motorenuntersuchungen. *MTZ - Motortechnische Zeitschrift* 78, S. 52 - 59.
- Hauptverband der Deutschen Bauindustrie E.V., Fachverbände der Bauindustrie Österreich. (2020). Baugeräteliste 2020. *Technisch-wirtschaftliche Baumaschinendaten*. Berlin/Wien, Deutschland: Bauverlag BV GmbH.
- Hiebl, E. (2018). *Effizienzsteigerung Durch Den Einsatz Von BIM in Der Bauausführung (Diplomarbeit)*. Wien: Print.
- Hong, J., Hong, T., Kang, H., & Lee, M. (Februar 2019). A Framework for Reducing Dust Emissions and Energy Consumption on Construction Sites. *Energy Procedia*, 158, S. 5092-5096. doi:10.1016/j.egypro.2019.01.637
- IBO – Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie GmbH. (2018). *Leitfaden zur Berechnung des Ökoindex OI3 für Bauteile und Gebäude*. Wien.
- Jüttemann, P. (kein Datum). *www.klein-windkraftanlagen.com*. Abgerufen am 30. August 2021, 11:50 von <https://www.klein-windkraftanlagen.com/strom-leistung-ertrag-kleinwindkraftanlage/>
- Kantner, H. (30. 03 2021). Erneuerbare Energie. (RMA, Interviewer)
- Karlsson, I., Rootzén, J., & Johnsson, F. (März 2020). Reaching Net-zero Carbon Emissions in Construction Supply Chains – Analysis of a Swedish Road Construction Project. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 120*.
- Khom, A. (16.. September 2021). *stadt-wien.at*. Abgerufen am 08.. Juli 2021, 15:30 von <https://www.stadt-wien.at/lifestyle/alternative-mobilitaet/elektroauto-preise-und-kosten.html>
- Kommunalkredit Public Consulting. (2019). *Climate Austria - Jahresbericht 2019*. Wien.
- Kommunalkredit Public Consulting GmbH. (kein Datum). *Climate Austria - CO<sub>2</sub>-Rechner*. Abgerufen am 30. August 2021, 12:00 von <https://co2calc.climateaustria.at/co2calculator/start?userGroup=business>
- Kommunalkredit Public Consulting GmbH. (kein Datum). *CO<sub>2</sub>-Kompensation: Climate Austria*. Abgerufen am 30. August 2021, 11:30 von <https://www.climateaustria.at/co2-kompensation.html>
- Kommunalkredit Public Consulting GmbH. (kein Datum). *www.climateaustria.at/projekte*. Abgerufen am 30. August 2021, 12:20 von <https://www.climateaustria.at/projekte.html>
- Kraftstoffverordnung 2012. (kein Datum). Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über die Qualität von Kraftstoffen und die nachhaltige Verwendung von Biokraftstoffen, BGBl. II Nr. 398/2012 idF BGBl. II Nr. 630/2020, §.
- Kranzl, S. (2018). *Treibhausgasemissionen von Strom - Empfehlungen zur Öko-Bilanzierung*. Wien: Umweltbundesamt GmbH.
- Lafenthaler, L. (07. 04 2021). Erneuerbare Energie - Windkraft. (RMA, Interviewer)

- Lahnaoui, A., Wulf, C., Heinrichs, H., & Dalmazzone, D. (Juli 2019). Optimizing Hydrogen Transportation System for Mobility via Compressed Hydrogen Trucks. *International Journal of Hydrogen Energy* Volume 44, Issue 35, S. 19302 - 19312.
- Länderarbeitskreis, Abfallwirtschaft, BMK Abteilung V/6. (2020). *EPS- und XPS-Dämmstoffabfälle ab der Baustelle - Leitfaden Entwurf*. Wien: Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK).
- Li, H., Zhang, L., Mah, D., & Yu, H. (März 2017). An integrated simulation and optimization approach for reducing CO2 emissions from on-site construction process in cold regions. *Energy and Buildings*, Volume 138, S. 666 - 675.
- Liebherr-Mischtechnik GmbH. (2019). *0% Emission - 100% Leistung - Elektrische Fahrmischer*. Abgerufen am 23. Juni 2021, 10:45 von <https://www.liebherr.com/shared/media/baumaschinen/betontechnik/dokumente/fahrmischer/fahrmischer-elektrisch-etm.pdf>
- Liimatainen, H., van Vliet, O., & Aplyn, D. (Februar 2019). The Potential of Electric Trucks – An International Commodity-level Analysis. *Applied Energy*, S. 804 - 814.
- Machhammer, O. (2021). Regenerativer Strom aus Deutschland oder E-Fuels aus Chile: Worauf sollte die zukünftige Mobilität bauen? *Chemie Ingenieur Technik* 93.4, S. 641 - 654.
- Madel, A. (kein Datum). *Photovoltaik.org*. Abgerufen am 16. September 2021, 10:30 von <https://www.photovoltaik.org/betrieb/photovoltaik-kosten>
- Märtel, C. (kein Datum). *www.photovoltaik-web.de*. Abgerufen am 16. September 2021, 10:20 von <https://www.photovoltaik-web.de/photovoltaik/module/sondermodule/solarfolien-pv-folien>
- Maus, W. (Hrsg.). (2019). *Zukünftige Kraftstoffe - Energiewende des Transports als ein weltweites Klimaziel*. Gladbach: Springer.
- Minder, D. (21. April 2010). *Aargauer Zeitung*. (C. R. AG, Herausgeber) Abgerufen am 27. August 2021, 10:15 von <https://www.aargauerzeitung.ch/panorama/vermishtes/weltweit-erste-co2-neutrale-grossbaustelle-in-spreitenbach-ld.2013267>
- Mlinar, C. (22. 04 2021). Verlagerung des LKW-Transports auf alternative Transportmittel – Beispiel Zug. (RMA, Interviewer)
- myclimate - Ihr Partner für den Klimaschutz*. (kein Datum). Abgerufen am 30. August 2021, 11:40 von [https://co2.myclimate.org/de/portfolios?calculation\\_id=4204116](https://co2.myclimate.org/de/portfolios?calculation_id=4204116)
- Nagl, C., Kroiss, F., & Fössl, H. (2009). *Luftschadstoffreduktionen bei Baustellen - Grundlagen für Anforderungen an öffentliche Bauausschreibungen*. Wien: Umweltbundesamt.
- Nikola. (Februar 2020). Nikola Unveils Range of Hydrogen Fuel Cell Trucks. Phoenix, AZ.
- Ogris, T. (30. 03 2021). Erneuerbare Energie - PV-Zelle. (RMA, Interviewer)
- Peng, B., Cai, C., Yin, G., Li, W., & Zhan, Y. (2015). Evaluation system for CO2 emission of hot asphalt mixture. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, Volume 2, Issue 2, S. 116 - 124. Von <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2015.02.005> abgerufen
- Photovoltaic Austria. (kein Datum). *GlobalStrahlung „Der Brennstoff der Photovoltaik“*. Abgerufen am 27. Juli 2021, 15:00 von <https://pvaustria.at/technische-grundlagen/>

- Poulsen, F. B. (kein Datum). *Biofuel Express*. Abgerufen am 23.. Juni 2021, 09:45 von <https://www.biofuel-express.com/de/hvo/>
- Projektleitstelle der MD-Stadtbaudirektion der Stadt Wien. (2004). *Richtlinien für eine umweltfreundliche Baustellenabwicklung - RUMBA LEITFADEN Teil 1: Allgemeine Einführung*. Wien.
- Projektleitstelle der MD-Stadtbaudirektion der Stadt Wien. (2004). *Richtlinien für eine umweltfreundliche Baustellenabwicklung – RUMBA. LEITFADEN Teil 2: Maßnahmen und Aktivitäten nach Baustellentypen*. Wien.
- Projektleitstelle der MD-Stadtbaudirektion der Stadt Wien. (2004). *Richtlinien für eine umweltfreundliche Baustellenabwicklung – RUMBA. LEITFADEN Teil 3: Fallbeispiele: Maßnahmen, Wirkungen und Kosten*. Wien.
- Rechnungshof Österreich. (2021). *Klimaschutz in Österreich – Maßnahmen und Zielerreichung 2020 - Bericht des Rechnungshofes*. Wien.
- Ren, Z., Chrysostomou, V., & Price, T. (2012). The Measurement of Carbon Performance of Construction Activities. *Smart and Sustainable Build Environment, vol. 1, no. 2*, S. 153 - 171. doi:10.1108/20466091211260596
- Republik Österreich Parlamentsdirektion. (15. Juli 2021). *Erneuerbaren-Ausbau-Gesetzespaket – EAG-Paket*. Abgerufen am 30. August 2021, 12:10 von [https://www.parlament.gv.at/PAKT/VHG/XXVII/I/I\\_00733/index.shtml](https://www.parlament.gv.at/PAKT/VHG/XXVII/I/I_00733/index.shtml)
- Romm, T., & Korab, R. (2007). *Monitoring zum Demonstrationsprojekt RUMBA, Richtlinien für umweltfreundliche Baustellenabwicklung: RUMBA-Demonstrationswohnbau Thürlhof "Ökologischste Baustelle Europas"*. Wien.
- Schaal, S. (06.. Juli 2020). *electrive.net Branchendienst für Elektromobilität*. Abgerufen am 05.. Juli 2021, 14:45 von <https://www.electrive.net/2020/07/06/hyundai-liefert-erste-h2-lkw-in-dieschweiz/>
- Schmid, R., & Keuchel, G. (2012). Umwelt Arena Spreitenbach - Raum für die Nachhaltigkeit. (Z. +.-u. Werbeges.m.b.H., Hrsg.) *Zement + Beton 2/13*, S. 42 - 47.
- Schmied, M., & Knörr, W. (2013). *Berechnung von Treibhausgasemissionen in Spedition und Logistik gemäß DIN EN 16258*. Bonn: DSLV Deutscher Speditions- .
- Schuster, M. (07.. Juni 2021). Dipl.-Ing. *Zukunft der Mobilität*. (T. Wien, Interviewer)
- Seo, M.-S., Kim, T., Hong, G., & Kim, H. (2016). On-Site Measurements of CO2 Emissions during the Construction Phase of a Building Complex. *Energies 2016, 9*, 599. Von <https://doi.org/10.3390/en9080599> abgerufen
- Solaranlage Ratgeber - Photovoltaik und Solarthermie Anlagen*. (kein Datum). Abgerufen am 16. September 2021, 10:00 von <https://www.solaranlage-ratgeber.de/photovoltaik/photovoltaik-wirtschaftlichkeit/photovoltaik-anschaffungskosten>
- statista.at. (2020). *Durchschnittlicher Preis für einen Liter Benzin und Diesel in Österreich von 2003 bis 2019*. Abgerufen am 08. Juli 2021, 09:30 von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/796448/umfrage/durchschnittlicher-preis-fuer-einen-liter-benzin-bzw-diesel-in-oesterreich/>

- statista.at. (2020). *Strompreis für private Haushalte in Österreich von 2009 bis 2020*. Abgerufen am 08.. Juli 2021, 10:30 von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/287837/umfrage/strompreise-fuer-privathaushalte-in-oesterreich/>
- statistik.at. (kein Datum). [https://www.statistik.at/web\\_de/statistiken/wirtschaft/preise/baupreisindex/index.html](https://www.statistik.at/web_de/statistiken/wirtschaft/preise/baupreisindex/index.html). Abgerufen am 08.. Juli 2021, 10:15
- Stockinger, A. (24. 03 2021). CO2-Kompensation. (RMA, Interviewer)
- Streitz, H. (02.. Juni 2021). MSc. *Zukünftige Antriebe von LKWs und Baumaschinen*. (T. Wien, Interviewer) Wien / Nenzing.
- Umweltbundesamt. (2009). *Luftschadstoffreduktion bei Baustellen*. Wien.
- Umweltbundesamt. (Oktober 2019). *Berechnung von Treibhausgas (THG)-Emissionen verschiedener Energieträger*. Abgerufen am 22. April 2021, 09:15 von <https://secure.umweltbundesamt.at/co2mon/co2mon.html>
- Umweltförderungsgesetz – UFG. (1993). Bundesgesetz über die Förderung von Maßnahmen in den Bereichen der Wasserwirtschaft, der Umwelt, der Altlastensanierung, zum Schutz der Umwelt im Ausland und über das österreichische JI/CDM-Programm für den Klimaschutz. *BGBl. Nr. 185/1993*. Wien. Abgerufen am 30. August 2021, 15:45 von <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10010755>
- Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., & Weidema, B. (2016). The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. (A. a. <<http://link.springer.com/10.1007/s11367-016-1087-8>>, Hrsg.) *The International Journal of Life Cycle Assessment*, [online] 21(9), S. 1218–1230. Abgerufen am 21. 04 2021
- Winkler, C. (2017). *Betriebsstoffverbrauch von Baumaschinen als Faktor einer ökoeffizienten Bauprozessoptimierung (Dissertation)*. IBPM, TU Wien, Wien: Print.
- xelectrix. (2019). *Innovative Hochvolt Energie- & Stromspeicher - xelectrix Power GmbH*. Abgerufen am 21. September 2021, 09:45 von <https://www.xelectrix-power.com/anwendungen/baustellen-bergbau-telekommunikation/>
- xelectrix. (2019). *Innovative Hochvolt Energie- & Stromspeicher - xelectrix Power GmbH*. Abgerufen am 21. September 2021, 10:00 von <https://www.xelectrix-power.com/produkte/>
- Zechmeister, A. (26. 03 2021). Erneuerbare Energie - PV-Folie. (RMA, Interviewer)

## Abkürzungsverzeichnis

Abk.	Abkürzung
BGBI.	Bundesgesetzblatt
Art.	Artikel
EPD	Environmental Product Declaration, Umweltproduktdeklaration
GWP	Global Warming Potential
THG	Treibhausgas
fB1	Fiktive Baustelle 1 – Wiener Wohnbau
fB2	Fiktive Baustelle 2 – thermische Sanierung eines Wohngebäudes
fB3	Fiktive Baustelle 3 – Infrastruktur, urbane Asphaltierarbeiten
fB4	Fiktive Baustelle 4 – Abriss eines Bürogebäudes

# 9 Anhang

## 9.1. Data Management Plan (DMP)

In dieser Forschungsdienstleistung wurden vier fiktive Baustellen untersucht. Für diese wurden Daten von realen, bereits realisierten Baustellen von den jeweils ausführenden Unternehmen zur Verfügung gestellt. Zu den bereitgestellten Daten zählen (unausgepreiste) Leistungsverzeichnisse, aus denen die Massen entnommen wurden. Diese Leistungsverzeichnisse beinhalteten auch Beschreibungstexte, denen viele Informationen zum Bauprojekt und zum Bauablauf entnommen werden konnten. Weiters wurden Bau- und Anlagenbeschreibungen, Baustelleneinrichtungspläne, teilweise Transportdaten, Daten zu Strom- und Dieserverbrauch auf der Baustelle sowie Details zum tatsächlichen Bauablauf bereitgestellt, die in persönlichen Gesprächen mit den jeweiligen Bauleitern erörtert werden konnten. Die Autor:innen haben sich den Unternehmen gegenüber verpflichtet, diese nicht explizit im Bericht zu erwähnen, da dadurch unternehmensinterne Details offenbart werden könnten.

Für die Umrechnung der Sachbilanz wurden Emissionsfaktoren aus zwei Quellen verwendet, die im Bericht unter Punkt 4.3.2 sowie 8. Verzeichnisse genau genannt sind. Während die Webseite des UBAs (Umweltbundesamt, 2019) derzeit frei zugänglich ist, ist die ecoinvent Datenbank kostenpflichtig. Die Rechte und Restriktionen der Lizenznehmer (Ressourcen Management Agentur (RMA)) ist in „End User Licence Agreement (EULA) for ecoinvent Database and ecoinvent Datasets“ beschrieben. Hier heißt es u.a.: „Der Lizenznehmer ist nicht berechtigt, wesentliche Teile der ecoinvent Datenbank oder der ecoinvent Datensätze zu vervielfältigen, zu verbreiten oder öffentlich auszustellen.“

**Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,  
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)**

Radetzkystraße 2, 1030 Wien

[bmk.gv.at](https://www.bmk.gv.at)