# VoltaVia

# Elektrifizierung von Groß-baustellen im Straßenbau

Ein Projekt finanziert im Rahmen der

D-A-CH Kooperation

Verkehrsinfrastrukturforschung 2024

**D-A-CH 2024**



# Impressum

**Programmerstellung und -finanzierung der D-A-CH Kooperation:**

Bundesministerium für Verkehr (BMV)
Invalidenstraße 44
10115 Berlin
Deutschland

Bundesministerium für Innovation, Mobilität und Infrastruktur (BMIMI)
Radetzkystraße 2
1030 Wien
Österreich

Bundesamt für Strassen (ASTRA)
Papiermühlestrasse 13
3063 Ittigen
Schweiz

**Programmmanagement:**

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Sensengasse 1
1090 Wien
Österreich

**Für den Projektinhalt verantwortlich:**

Zeppelin Rental GmbH
Graf-Zeppelin-Platz 1
85748 Garching b. München
Deutschland

# VoltaVia

# Elektrifizierung von Großbaustellen im Straßenbau

# D-A-CH 2024


**Auftragnehmer**

Zeppelin Rental GmbH

Production Engineering of E-Mobility Components (PEM) der RWTH Aachen University (Unterauftragnehmer)

HX Mobility GmbH (Unterauftragnehmer)

**Autorinnen und Autoren**

Dr. Markus Heidak (Zeppelin Rental GmbH)

Axel Hätinger (HX Mobility GmbH)

Philipp Euchner (PEM der RWTH Aachen)

Ferdinand Cordes (PEM der RWTH Aachen)

Fabian Jonen (PEM der RWTH Aachen)

Yannik Lowis (PEM der RWTH Aachen)

# Inhaltsverzeichnis


**1 Projektorganisation und -durchführung (AP 1) ..... 7**
**1.1 Arbeitspakete ..... 7**
**1.2 Methodischer Ansatz ..... 9**

**2 Elektrifizierung von Großbaustellen (AP 2) ..... 11**
**2.1 Analyse Stand der Technik (AP 2.1) ..... 11**
2.1.1 Literaturrecherche (Methodik) ..... 11
2.1.2 Literaturrecherche (Ergebnisse) ..... 14
2.1.3 Anforderungen für ein Elektrifizierungskonzept ..... 17
**2.2 Analyse Stand der Elektrifizierung (AP 2.2) ..... 23**
2.2.1 Experteninterviews (Methodik) ..... 23
2.2.2 Ergebnisse der Interviews mit Straßenbauunternehmen ..... 25
2.2.3 Ergebnisse der Interviews mit Baumaschinenherstellern ..... 26
2.2.4 Zusammenfassende Einordnung und Implikationen aus den Experteninterviews ..... 28
**2.3 Trendanalyse der Gerätetechnik (AP 2.3) ..... 30**
2.3.1 Methodik der Trendanalyse ..... 30
2.3.2 Ergebnisse der Trendanalyse ..... 33
**2.4 Ableitung von Infrastrukturkonzepten (AP 2.4) ..... 38**
**2.5 Entwicklung eines Gesamtkonzepts (AP 2.5) ..... 44**
2.5.1 Voraussetzungen für eine Wasserstoffinfrastruktur ..... 45
2.5.2 Voraussetzungen für eine Strominfrastruktur ..... 47
**2.6 Konzeptbewertung (AP 2.6) ..... 50**
2.6.1 Beispiel: Grundhafte Sanierung / Asphaltstraße / Walzasphalt ..... 54
2.6.2 Beispiel: Grundhafte Sanierung / Asphaltstraße / Gussasphalt ..... 69
2.6.3 Beispiel: Grundhafte Sanierung einer Betonstraße ..... 72
2.6.4 Beispiel: Deckensanierung einer Asphaltstraße mit Walzasphalt ..... 74
2.6.5 Beispiel: Deckensanierung einer Asphaltstraße mit Gussasphalt ..... 77
2.6.6 Ergebnisse ..... 79

**3 Ausschreibungen von Großprojekten (AP 3) ..... 82**
**3.1 Methodisches Vorgehen ..... 82**
**3.2 Analyse des Status Quo der Vergabemechanismen (AP 3.1) 83**
3.2.1 Einordnung der Vergabeverfahren ..... 83
3.2.2 Vergabemechanismen im D-A-CH-Vergleich ..... 85

3.2.3 Erweiterter europäischer Vergleich ..... 86
3.2.4 Ergebnisse der Experteninterviews ..... 87
**3.3 Definition nachhaltiger Vergabekriterien (AP 3.2, 3.3) ..... 88**
3.3.1 Ableitung möglicher Vergabekriterien ..... 88
3.3.2 Vergabe mittels Betriebsmittellogistik ..... 90
3.3.3 Ansätze im Bereich der Fuhrparkplanung ..... 90
3.3.4 Ansätze im Bereich der Baustellendurchführung ..... 91
3.3.5 Methodische Einordnung der Indexvarianten ..... 92
3.3.6 Abgrenzung der Vergabekriterien ..... 93
3.3.7 Ausarbeitung des Bepunktungssystems ..... 94
3.3.8 Kalibrierung des Bepunktungssystems ..... 102
**3.4 Beispielrechnung ..... 110**
**3.5 Einordnung in das Gesamtbild der Zuschlagssystematik ..... 111**
**3.6 Handlungsempfehlung (AP 3.4) ..... 113**

**4 Auswirkungen auf die Baubranche (AP 4) ..... 115**
**4.1 Technische Auswirkungen (AP 4.1) ..... 115**
4.1.1 Abgrenzung der betrachteten Baustellen ..... 115
4.1.2 Annahmen zu Fahrzeugflotte und Energieverbrauch ..... 117
4.1.3 Jährlicher elektrischer Energiebedarf ..... 118
4.1.4 Leistungsbedarf ..... 119
**4.2 Auswirkungen auf die Baustellendurchführung (AP 4.1) ..... 120**
**4.3 Wirtschaftliche und organisatorische Auswirkungen auf die Baufirmen (AP 4.1) ..... 123**
**4.4 Bezugnahme zum Status Quo und Bewertung der Auswirkungen (AP 4.2) ..... 125**

**5 Zusammenfassung ..... 127**

**6 Verzeichnisse ..... 133**
**6.1 Abbildungsverzeichnis ..... 133**
**6.2 Tabellenverzeichnis ..... 137**
**6.3 Literaturverzeichnis ..... 138**

**7 Anhang ..... 147**

**Transparenzhinweis zum Einsatz von KI-Systemen:**

Für die Erstellung dieses Berichts wurden KI-basierte Systeme in unterstützender Funktion eingesetzt. Die Nutzung beschränkte sich auf die Generierung von Illustrationen sowie auf Hilfestellungen bei Strukturierung, Formulierung und sprachlicher Überarbeitung von Texten. KI-generierte Bilder wurden ausschließlich zur Darstellung exemplarischer Fahrzeug- und Anwendungsszenarien erstellt. Etwaige Ähnlichkeiten mit existierenden Fahrzeugen, Produkten, Marken oder Herstellern sind unbeabsichtigt und begründen keinerlei tatsächlichen Bezug, Empfehlung oder Aussage über reale Unternehmen. Alle durch KI unterstützen Inhalte wurden vor Veröffentlichung durch die Projektpartner fachlich geprüft, überarbeitet und freigegeben. Die Verantwortung für die sachliche Richtigkeit, Vollständigkeit und Schlussfolgerungen des Berichts verbleibt ausschließlich bei den Verfassenden.

# 1 Projektorganisation und -durchführung (AP 1)

Das Projekt VoltaVia verfolgt das Ziel, die Elektrifizierung von Großbaustellen im Straßenbau systematisch zu analysieren, technische und wirtschaftliche Lösungsansätze für einen sukzessive zunehmenden Anteil elektrischer Baumaschinen zu bewerten sowie Handlungsempfehlungen und Kriterien für zukünftige Ausschreibungen zu definieren und anwendbar zu machen. Der Projektaufbau gliedert sich in mehrere Arbeitspakete, die von der Bestandsaufnahme über die Konzeptentwicklung bis hin zur Bewertung der Auswirkungen auf die Baubranche reichen.

## 1.1 Arbeitspakete

**AP1: Projektmanagement**

Das Projektmanagement gewährleistete während der Projektlaufzeit die kontinuierliche fachliche, organisatorische und terminliche Steuerung des Vorhabens. Hierzu fanden zwischen den mit der Projektbearbeitung betrauten Personen regelmäßige wöchentliche Abstimmungstermine statt. Zu Projektbeginn wurde gemeinsam mit den Projektverantwortlichen des Auftraggebers eine Kick-off-Veranstaltung durchgeführt. Im Rahmen dieses Termins wurden die Projektziele, Zuständigkeiten, Arbeitspakete sowie das geplante Vorgehen abgestimmt. Im weiteren Verlauf fanden sechs Projektstatusgespräche mit dem Auftraggeber statt. Dabei wurden der aktuelle Bearbeitungsstand, wesentliche Zwischenergebnisse und die nächsten Arbeitsschritte vorgestellt und gemeinsam abgestimmt. Nach Fertigstellung des Abschlussberichts ist eine abschließende Präsentation der Projektergebnisse vorgesehen. Darin werden die zentralen Erkenntnisse des Vorhabens, das entwickelte Elektrifizierungskonzept sowie die daraus abgeleiteten Handlungs- und Forschungsbedarfe zusammenfassend dargestellt.

**AP 2: Elektrifizierung von Großbaustellen**

Im ersten fachlichen Schwerpunkt wurde der Stand der Technik zur Elektrifizierung von Großbaustellen analysiert. Die Untersuchung umfasste sowohl moderne elektrische Baumaschinen als auch internationale Lösungsansätze für die Baustellenelektrifizierung mit besonderem Fokus auf die D-A-CH-Region. Grundlage der Analyse bildeten umfassende Literaturrecherchen sowie ergänzende Interviews mit Industrievertretern und Fachexperten.

Die gewonnenen Erkenntnisse wurden mittels deskriptiver statistischer Verfahren ausgewertet. Ziel war es, den technologischen Entwicklungsstand transparent darzustellen sowie zentrale Trends, Potenziale und bestehende

Herausforderungen systematisch zu identifizieren. Auf dieser Basis erfolgte eine weiterführende Trendanalyse der Gerätetechnik sowie die Entwicklung von Infrastrukturkonzepten für zukünftige elektrifizierte Großbaustellen.

Dabei wurden insbesondere Anforderungen an Energieversorgung, Ladeinfrastruktur und baustellennahe Versorgungslösungen berücksichtigt. Die unterschiedlichen Ansätze wurden anschließend mithilfe von Konzeptplanungen und Nutzwertanalysen bewertet. Daraus wurde ein integriertes Gesamtkonzept zur Elektrifizierung von Großbaustellen abgeleitet und anhand definierter Kriterien quantitativ bewertet. Ergänzend nutzte das Projektteam die BAUMA 2025 für den direkten Austausch mit Herstellern (OEMs) im Rahmen von Technologierundgängen und Produktpräsentationen (Abbildung 1). Dadurch konnten aktuelle Marktentwicklungen, verfügbare Technologien und zukünftige Produktstrategien der Hersteller in die Bewertung einbezogen und die Ergebnisse zusätzlich validiert werden.



*Abbildung 1: Treffen des Projektteams und Beiratsmitglieder auf der Branchen Messe BAUMA in München 2025 (zu sehen sind Vertreterinnen und Vertreter der Autobahn GmbH, BASt, RWTH Aachen und Zeppelin Rental).*

**AP 3: Ausschreibungen von Großprojekten**

Im nächsten Schritt des Projekts werden die Auswirkungen der Baustellenelektrifizierung auf Ausschreibungs- und Vergabeprozesse bei Großbauprojekten untersucht. Hierzu wird zunächst der Status quo bestehender Vergabeverfahren in der D-A-CH-Region analysiert. Darauf aufbauend werden die Auswirkungen elektrifizierter Baustellen auf zukünftige Anforderungen und Bewertungskriterien in Ausschreibungen untersucht. Ein besonderer Fokus liegt auf der Gegenüberstellung bestehender und potenziell neuer Vergabekriterien. Mithilfe von Nutzwertanalysen, Delphi-Befragungen sowie Paarvergleichsverfahren werden die einzelnen Kriterien bewertet und hinsichtlich ihrer zukünftigen Relevanz gewichtet. Auf Basis der Ergebnisse entwickelt das Projekt konkrete Handlungsempfehlungen für Auftraggeber und Entscheidungsträger. Diese werden in einer Roadmap gebündelt, die als Orientierungsrahmen für die Weiterentwicklung zukünftiger Ausschreibungs- und Vergabestrategien dient und den Übergang zu elektrifizierten Baustellen unterstützt.

**AP4: Auswirkungen auf die Baubranche**

Das abschließende Arbeitspaket untersucht die übergeordneten Auswirkungen der Baustellenelektrifizierung auf die Bauindustrie. Im Fokus stehen die technischen, wirtschaftlichen und organisatorischen Veränderungen, die sich für Unternehmen der Bauwirtschaft in der D-A-CH-Region ergeben. Hierzu werden Branchenbefragungen durchgeführt und die gewonnenen Erkenntnisse statistisch ausgewertet. Ergänzend werden mithilfe von Szenario-Techniken mögliche Entwicklungspfade der Branche analysiert. Durch die Gegenüberstellung des heutigen Status quo mit potenziellen Zukunftsszenarien werden Chancen, Herausforderungen sowie erforderliche Anpassungsmaßnahmen systematisch identifiziert und bewertet. Die Ergebnisse werden in einer fundierten Gesamtbewertung zusammengeführt, die die langfristigen Auswirkungen der Elektrifizierung auf die Bauwirtschaft beschreibt und Handlungsperspektiven für Unternehmen, Auftraggeber und weitere Branchenakteure aufzeigt.

## 1.2 Methodischer Ansatz

Das Projekt kombiniert verschiedene wissenschaftliche und praxisorientierte Methoden (Abbildung 2). Zu den zentralen Instrumenten gehören:

- Literaturrecherchen zur Analyse des Standes der Technik
- Industrie- und Expertenbefragungen
- Deskriptive statistische Auswertungen
- Konzeptentwicklungen und Konzeptplanungen
- Nutzwertanalysen zur Bewertung von Lösungsalternativen
- Delphi-Methoden zur Experteneinschätzung zukünftiger Entwicklungen

- Paarvergleichsverfahren zur Gewichtung von Kriterien
- Szenario-Techniken zur Betrachtung möglicher Zukunftsbilder
- Quantitative Kriterienbewertungen zur objektiven Entscheidungsfindung

Durch diesen mehrstufigen Ansatz verbindet VoltaVia technologische Analysen, wirtschaftliche Bewertungen und strategische Zukunftsbetrachtungen. Das Projekt liefert damit sowohl konkrete Konzepte für die Umsetzung elektrifizierter Großbaustellen als auch Empfehlungen für Vergabeprozesse und die Weiterentwicklung der Bauindustrie.

| | | | Umfang | Methoden | Auswertung |
|---|---|---|---|---|---|
| AP1: Projektmanagement | Vorstudie | **AP2: Elektrifizierung von Großbaustellen** | | | |
| | | **AP2.1:** Analyse des weltweiten Stands der Technik zu Baustellen, Baumaschinen | Global, Fokus DACH | Literaturrecherche, Industriebefragung | Deskriptive Statistik |
| | | **AP2.2:** Analyse des weltweiten Stands der Technik zu Elektrifizierung | Global, Fokus DACH | Literaturrecherche, Industriebefragung | Deskriptive Statistik |
| | Hauptstudie | **AP2.3:** Trendanalyse der Gerätetechnik | Global, Fokus DACH | Literaturrecherche, Industriebefragung | Deskriptive Statistik |
| | | **AP2.4:** Ableitung von Infrastrukturkonzepten | Straßenbaustelleninfrastruktur | Integrierte Konzeptplanung | Konzeptentwürfe |
| | | **AP2.5:** Erarbeitung eines Gesamtkonzepts | Konzepte aus 2.4 | Nutzwertanalyse | Konzeptentwurf |
| | | **AP2.6:** Konzeptbewertung | Gesamtkonzept | Quantitative Kriterienbetrachtung | Deskriptive Statistik |
| | Schluss-folgerungen | **AP3: Ausschreibung von Großprojekten** | | | |
| | | **AP3.1:** Analyse des Status Quo der derzeitigen Vergaben | DACH-Region | Literaturrecherche, Industriebefragung | Deskriptive Statistik |
| | | **AP3.2:** Definition nachhaltiger Zielkriterien/Vergabekriterien | Fokus Nachhaltigkeit | Nutzwertanalyse | Kriterienkatalog |
| | | **AP3.3:** Gewichtung aller Vergabekriterien | Neue & alte Kriterien | Delphi-Methode | Paarweiser Vergleich |
| | | **AP3.4:** Empfehlung für eine Entscheidungsgrundlage | Neue & alte Kriterien | Szenario-Technik | Roadmap |
| | Bewertung | **AP4: Auswirkungen auf die Baubranche** | | | |
| | | **AP4.1:** Analyse technischer, wirtschaftlicher und organisatorischer Auswirkungen | DACH-Region | Industriebefragung | Deskriptive Statistik |
| | | **AP4.2:** Bezugnahme zum Status Quo und Bewertung der Auswirkungen | DACH-Region | Szenario-Technik | Stellungnahme |

*Abbildung 2: Forschungsansatz und methodischen Vorgehen*

# 2 Elektrifizierung von Großbaustellen (AP 2)

## 2.1 Analyse Stand der Technik (AP 2.1)

### 2.1.1 Literaturrecherche (Methodik)

Zur Identifikation des aktuellen Forschungsstands sowie bestehender Wissenslücken wurde im Projekt eine systematische Literaturrecherche durchgeführt. Das Vorgehen folgte einem mehrstufigen, wissenschaftlich fundierten Prozess, der von der Definition des Untersuchungsrahmens über die Recherche und Analyse relevanter Veröffentlichungen bis zur Ableitung einer Forschungsagenda reichte (Abbildung 3).

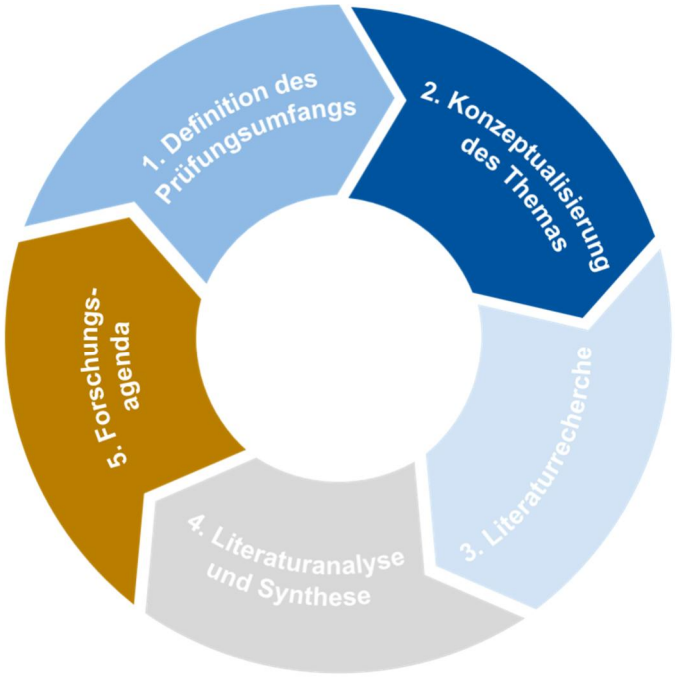



*Abbildung 3: Konzeptionelles Vorgehen der Literaturrecherche (in Anlehnung an Brocke et al. [1] und Webster et al. [2])*

***Definition des Prüfungsumfangs:*** Zu Beginn wurde der Untersuchungsumfang festgelegt. Hierbei erfolgte eine klare Abgrenzung des Forschungsgegenstands sowie der relevanten Fragestellungen. Ziel war es, den Betrachtungsrahmen für die Elektrifizierung von Großbaustellen sowie die damit verbundenen technischen, wirtschaftlichen und organisatorischen Aspekte festzulegen. Gleichzeitig wurden die Zielsetzungen der Literaturrecherche definiert und die zentralen Forschungsfragen abgeleitet.

***Konzeptualisierung des Themas:*** Im nächsten Schritt erfolgte die inhaltliche Strukturierung des Untersuchungsgegenstands. Hierzu wurden die relevanten Objektbereiche, beispielsweise Baustelleninfrastruktur, Baumaschinen, Energieversorgung oder Vergabeprozesse, definiert. Ergänzend wurden die Zielbereiche festgelegt, die den Anwendungsbezug der Forschung beschreiben. Auf dieser Grundlage wurden geeignete Suchbegriffe und Suchkombinationen entwickelt, um die wissenschaftliche Literatur systematisch erfassen zu können.

**Durchführung der Literaturrecherche:** Die Recherche erfolgte in anerkannten wissenschaftlichen Datenbanken wie **Scopus** und **Web of Science**. Zunächst wurde eine breite Datengrundlage aufgebaut, indem anhand der definierten Schlagwörter relevante Veröffentlichungen identifiziert wurden. Die Literaturauswahl erfolgte stufenweise:

- ***Filterstufe 1 – Wissenschaftliche Quellen:*** Zunächst wurden ausschließlich wissenschaftliche und qualitätsgesicherte Quellen berücksichtigt. Dadurch wurde sichergestellt, dass die Analyse auf belastbaren und wissenschaftlich anerkannten Veröffentlichungen basiert.

- ***Filterstufe 2 – Schlagwortbasierte Eingrenzung:*** Basierend auf den definierten Objekt- und Zielbereichen wurden Suchbegriffe entwickelt und miteinander kombiniert. Die Recherche führte zu einem umfangreichen Literaturbestand von insgesamt rund **15.021 Treffern**, die als potenziell relevant eingestuft wurden.

***Literaturanalyse und Synthese:*** Im Anschluss wurde die identifizierte Literatur anhand definierter Auswahlkriterien systematisch bewertet und reduziert (Abbildung 4). Die Eingrenzung erfolgte schrittweise über verschiedene Informationsebenen:

- Prüfung der Titel auf thematische Relevanz (272 Publikationen)
- Analyse der Abstracts (127 Publikationen)
- Bewertung der Volltexte (91 Publikationen)
- Berücksichtigung zusätzlicher Kriterien wie Forschungsfeld, Branche oder Anwendungsbereich (65 Publikationen)

Die 65 verbleibenden Publikationen ([3] bis [67) bildeten die Grundlage für die weitere Literaturanalyse.

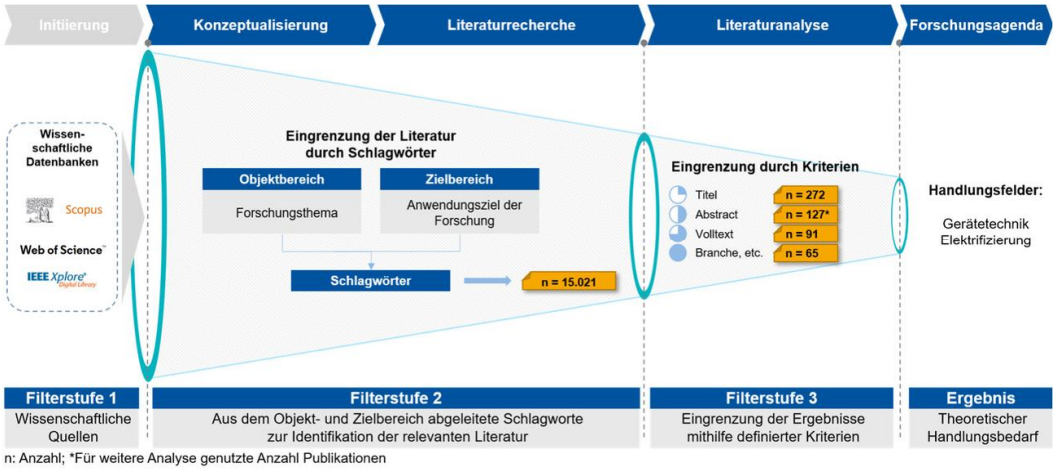



*Abbildung 4: Fünf Schritte für eine systematische Literaturrecherche (Darstellung, RWTH Aachen)*

Durch diesen mehrstufigen Auswahlprozess konnte die Literaturbasis auf jene Veröffentlichungen konzentriert werden, die einen direkten Beitrag zur Beantwortung der Forschungsfragen leisten. Anschließend erfolgte eine strukturierte Inhaltsanalyse der ausgewählten Publikationen. Ziel war die Identifikation von Zusammenhängen, Trends, Erfolgsfaktoren, Herausforderungen sowie bestehenden Forschungslücken. Die Erkenntnisse wurden thematisch zusammengeführt und zu einem konsistenten Gesamtbild synthetisiert. Zur Vertiefung der Literaturauswertung wurden ausgewählte Schlagwortkombinationen untersucht:

- Baumaschinen und Batterie
- Baumaschinen und Elektrifizierung
- Baumaschinen und Brennstoffzelle
- Infrastruktur und Batterie
- Infrastruktur und Elektrifizierung
- Infrastruktur und Wasserstoff

Die nachfolgende Ergebnisdarstellung fasst die wesentlichen Erkenntnisse der Literaturanalyse zusammen. Für eine vertiefende Betrachtung der einzelnen Themenfelder wird auf die 65 im Rahmen der Literaturrecherche ausgewerteten Publikationen verwiesen, die im Literaturverzeichnis unter den Quellen [3] bis [67] aufgeführt sind.

***Entwicklung einer Forschungsagenda:*** Die Ergebnisse der Literaturanalyse bildeten die Grundlage für die Erstellung einer Forschungsagenda. Dabei

wurden bestehende Wissenslücken, offene Fragestellungen und zukünftige Forschungsbedarfe identifiziert. Die Forschungsagenda dient als Orientierung für die weiteren Arbeitspakete des Projekts und unterstützt die Entwicklung praxisorientierter Lösungsansätze für die Elektrifizierung von Großbaustellen.

### 2.1.2 Literaturrecherche (Ergebnisse)

Die Literaturrecherche zeigt regionale Unterschiede in den Forschungsschwerpunkten zur Elektrifizierung und Dekarbonisierung des Bausektors.

Abbildung 5 stellt die dominierenden Themenfelder der Regionen AMER, EMEA und APAC gegenüber. Trotz unterschiedlicher Schwerpunktsetzungen bestehen deutliche Überschneidungen. Die internationalen Forschungsaktivitäten konzentrieren sich in allen Regionen auf die Elektrifizierung von Maschinen, nachhaltige Energieversorgungskonzepte sowie Ansätze der Kreislaufwirtschaft.




*Abbildung 5: Übersicht der Top-Themen je Wirtschaftsregion nach Häufigkeit der Nennung [3] bis [67]*

Die Unterschiede liegen weniger in den behandelten Themenfeldern als vielmehr in deren Gewichtung (Tabelle 1). Während in Nord- und Südamerika insbesondere Antriebstechnologien und Energiespeicher im Fokus stehen, beschäftigen sich europäische Forschungsaktivitäten verstärkt mit Emissionsminderung, Transformationsprozessen und regulatorischen Rahmenbedingungen. Im asiatisch-pazifischen Raum dominieren Themen wie Energieeffizienz, Maschinenoptimierung und Emissionsreduktion.

*Tabelle 1: Übersicht der regionalen Forschungsschwerpunkte [3] bis [67]*

| ***Region*** | ***Zentrale Forschungsschwerpunkte*** | ***Besonderer Fokus*** |
|---|---|---|
| **AMER** | Elektrifizierung von Off-Highway- und Off-Road-Fahrzeugen, alternative Energiespeicher, nachhaltige Energieversorgung, Kreislaufwirtschaft | Antriebstechnologien und Energiespeicher für mobile Maschinen |
| **EMEA** | Elektrifizierung von Bau- und Transportmaschinen, Emissionsreduktion, nachhaltige Energieversorgung, Transformationsprozesse | Dekarbonisierung und Transformation der Bauwirtschaft |
| **APAC** | Emissionsminderung, Energieeffizienz, Elektrifizierung von Maschinen, Optimierung von Baumaschinen | Effizienzsteigerung und Emissionsreduktion |

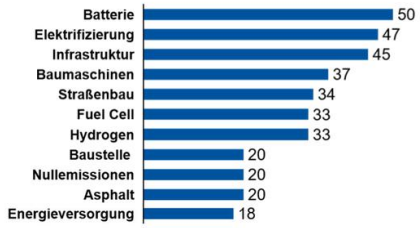
Unabhängig von den regionalen Schwerpunkten zeigt die Literatur, dass die Elektrifizierung von Großbaustellen technisch bereits in vielen Anwendungsbereichen möglich ist. Die Umsetzung wird jedoch weiterhin durch infrastrukturelle, wirtschaftliche und organisatorische Herausforderungen begrenzt. [3] [4] Insbesondere bei schweren elektrischen Baumaschinen stellen hohe Leistungs- und Energieanforderungen besondere Anforderungen an die Dimensionierung der Antriebs- und Energieversorgungssysteme. [5] [14]

Aus der Gesamtschau der Literatur ergibt sich zudem, dass die Elektrifizierung einzelner Maschinen allein nicht ausreicht. Vielmehr ist ein systemischer Ansatz erforderlich, der Maschinen, Energieversorgung, Speicher, Logistik und Baustellenbetrieb integriert betrachtet. Darüber hinaus können eine optimierte Baustellenplanung und die Reduzierung unnötiger Maschinenlaufzeiten dazu beitragen, die betriebsbedingten Emissionen der Bauausführung zu reduzieren. [6] Technologisch stehen batterieelektrische Antriebe derzeit im Mittelpunkt der Entwicklung. [7] Während kleine Baumaschinen zunehmend vollelektrisch betrieben werden, gewinnen bei größeren Maschinen Hybridkonzepte, Batteriewechselsysteme, kabelgebundene Lösungen und Brennstoffzellen an Bedeutung. [7][8] Wasserstoff beziehungsweise Brennstoffzellensysteme werden darüber hinaus als ergänzende Technologie für die Elektrifizierung von Off-Road- und Baumaschinen diskutiert. [9]

Ein weiterer Schwerpunkt der Literatur liegt auf der für die Elektrifizierung erforderlichen Energie- und Versorgungsinfrastruktur. Neben der Bereitstellung ausreichender Energiekapazitäten werden Energiespeicher sowie unterschiedliche Lade- und Versorgungskonzepte als relevante Bestandteile zukünftiger Energieversorgungssysteme betrachtet. [10] Darüber hinaus werden Wasserstoffversorgungs- und -logistikketten sowie perspektivisch eRoad-Konzepte als weitere technologische Ansätze diskutiert. [11][12] Gleichzeitig wird erwartet, dass Nachhaltigkeits- und Emissionskriterien künftig eine deutlich größere Rolle in Ausschreibungs- und Vergabeverfahren spielen werden. [3][13]

Zusammenfassend zeigt die Literaturauswertung, dass die Elektrifizierung von Großbaustellen nicht allein auf die Antriebstechnologie einzelner Baumaschinen reduziert werden kann. Vielmehr sind die technischen Anforderungen der Maschinen, deren Einsatzprofile sowie die Energieversorgung und die hierfür erforderliche Infrastruktur gemeinsam zu berücksichtigen. [4] [7] Die technische und wirtschaftliche Eignung unterschiedlicher Technologiekonzepte ist dabei wesentlich vom jeweiligen Einsatzprofil und den Rahmenbedingungen der Energieversorgung abhängig. [7] [14] Gleichzeitig verdeutlichen die Studien, dass eine ganzheitliche Betrachtung des Lebenszyklus erforderlich ist, um insbesondere die ökologischen Auswirkungen unterschiedlicher Technologiekonzepte belastbar bewerten zu können. [15] [21][23]

Die in der Literatur behandelten thematischen Schwerpunkte werden ergänzend in Abbildung 6 anhand der Häufigkeit ausgewählter Begriffe dargestellt.




**Zusammenfassung der wichtigsten Auswertungsergebnisse**

- **Top-3** Schlagwörter in der Literatur sind "**Batterie**", "**Elektrifizierung**" und "**Infrastruktur**"
- **Kreuzreferenziert** werden insbesondere "**Baumaschinen**" und "**Infrastruktur**" in Kombination mit "**Batterie**" und "**Elektrifizierung**" am häufigsten benannt
- "**Wasserstoff**" und "**Infrastruktur**" sowie "**Brennstoffzelle**" und "**Baumaschinen**" treten ebenfalls **häufig in Kombination** auf

| - | Batterie | Brennstoffzelle | Wasserstoff | Nullemission | Elektrifizierung | Asphalt |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Straßenbau | 14 | 11 | 13 | 8 | 17 | 17 |
| Baustelle | 11 | 9 | 8 | 7 | 7 | 8 |
| Baumaschinen | **26** | **21** | 15 | 12 | **25** | 8 |
| Infrastruktur | **25** | 18 | **22** | 15 | **25** | 18 |
| Energieversorgung | 13 | 12 | 15 | 7 | 12 | 5 |

*Abbildung 6: Übersicht der Nennung von Schlagwörtern innerhalb der Fachliteratur [3] bis [67]*

Die Literaturrecherche zeigt zugleich, dass trotz erheblicher technologischer Fortschritte weiterhin wesentliche Forschungslücken bestehen. In der ausgewerteten Literatur konnten insbesondere keine standardisierten Methoden zur gemeinsamen technischen, ökologischen und wirtschaftlichen Bewertung elektrifizierter Baustellen identifiziert werden. Darüber hinaus werden integrierte Infrastrukturkonzepte, die Netzanschlüsse, Ladeinfrastruktur, Batteriespeicher und Wasserstoffversorgung gemeinsam betrachten, bislang nur begrenzt untersucht.

Ebenso konnten nur in begrenztem Umfang belastbare Wirtschaftlichkeitsanalysen über den gesamten Lebenszyklus unterschiedlicher Technologiekonzepte identifiziert werden. Auch die Wechselwirkungen zwischen Baustellenbetrieb, Energienetz, Ladeinfrastruktur und mobilen Energiesystemen werden in

der ausgewerteten Literatur bislang nur teilweise betrachtet. Die identifizierten Forschungslücken verdeutlichen, dass die erfolgreiche Elektrifizierung von Großbaustellen nicht allein eine Frage der Antriebstechnologie ist, sondern ein integriertes Verständnis des Gesamtsystems Baustelle erfordert.

Auf Grundlage dieser Erkenntnisse werden im Folgenden die wesentlichen Anforderungen abgeleitet, die bei der Entwicklung eines ganzheitlichen Elektrifizierungskonzepts für Großbaustellen zu berücksichtigen sind.

### 2.1.3 Anforderungen für ein Elektrifizierungskonzept

Aus der Literaturanalyse ergeben sich konkrete Anforderungen an die Entwicklung des Elektrifizierungskonzepts. Das Konzept sollte nicht pauschal, sondern differenziert nach **Maschinentyp**, **Leistungsbedarf**, **Einsatzdauer**, **Mobilitätsanforderungen** sowie verfügbaren **Lade- und Betankungsmöglichkeiten** ausgearbeitet werden. Ebenso ist die Energieversorgung frühzeitig in die Baustellenplanung einzubeziehen. Speicher-, Lade- und Logistiklösungen müssen auf den zeitlichen und räumlichen Energiebedarf der Baustelle abgestimmt werden, damit Maschinenverfügbarkeit, Netzanschluss und Bauablauf zusammen funktionieren.

#### Antriebskonzepte nach Maschinentyp und Einsatzprofil

Für kleinere und weniger energieintensive Baumaschinen sind vorrangig batterieelektrische Antriebskonzepte zu berücksichtigen. Bei mittleren und großen Maschinen sollte dagegen projektbezogen geprüft werden, welche Kombination aus Antriebs- und Versorgungstechnologien zum jeweiligen Einsatzprofil passt. [4] [7] Dabei sind insbesondere folgende Kriterien zu berücksichtigen:

- Leistungs- und Energiebedarf der Maschine
- tägliche Einsatzdauer und Auslastung
- erforderliche Mobilität auf der Baustelle
- verfügbare Lade- beziehungsweise Betankungszeiten
- Eignung von Batteriewechselsystemen und ergänzenden Energiespeichern

Für große, stationär oder überwiegend baustellengebunden eingesetzte Maschinen sollten zusätzlich kabelgebundene Konzepte geprüft werden. Eine direkte Stromversorgung kann große Batteriespeicher teilweise vermeiden und damit Anforderungen an Gewicht, Bauraum und Ressourcen reduzieren. [7] Voraussetzung hierfür sind leistungsfähige Stromanschlüsse, die sicher in den Baustellenbetrieb integriert werden können.

Für besonders schwere und energieintensive Maschinen besteht weiterhin Entwicklungsbedarf, insbesondere bei der Bereitstellung hoher Leistungs- und Drehmomentanforderungen durch elektrische Antriebssysteme. [5] [14]

Für energieintensive Maschinen und Standorte mit begrenzter elektrischer Anschlussleistung können wasserstoffbasierte Systeme eine ergänzende Option darstellen. Das Elektrifizierungskonzept muss in diesem Fall nicht nur den Maschinentyp und das Einsatzprofil berücksichtigen, sondern auch die Herkunft, Bereitstellung, den Transport, die Lagerung, die Betankung und die Sicherheitsanforderungen des Wasserstoffs. [9] [11]

**Ladeinfrastruktur, Speicher und Lastmanagement**

Für batterieelektrische Maschinen ist eine geeignete Ladeinfrastruktur ein zentraler Erfolgsfaktor. Neben stationären und mobilen Ladeeinrichtungen sind mobile Speicher- und Wechselkonzepte frühzeitig in die Baustellenlogistik einzubinden. Batteriespeicher ermöglichen grundsätzlich eine zeitliche Entkopplung von Energiebezug und Energiebedarf. [10] Für Baustellen ergibt sich die Möglichkeit, Batteriespeicher zur Begrenzung von Leistungsspitzen und zur effizienteren Nutzung vorhandener Anschlusskapazitäten einzusetzen.

Daraus lässt sich ableiten, dass die Energieversorgung bereits in der Planungs- und Ausschreibungsphase auf Basis differenzierter Energie- und Leistungsbedarfe konzipiert werden sollte. Dafür ist eine enge Abstimmung mit Netzbetreibern, Auftraggebern, Bauunternehmen und weiteren Projektbeteiligten erforderlich. Netzanschlüsse, mobile Energieversorgungslösungen, Batteriespeicher, lokale erneuerbare Energieerzeugung und intelligente Lastmanagementsysteme sind gemeinsam zu betrachten. Ein abgestimmtes Lastmanagement kann Leistungsspitzen reduzieren und vorhandene Netz- und Versorgungskapazitäten effizienter nutzbar machen.

**Schnittstellen zu Verkehrswegen und übergeordneten Infrastrukturen**

Perspektivisch sind mögliche Synergien und Nutzungskonflikte mit Lade- und Energieinfrastrukturen entlang der Verkehrswege zu berücksichtigen. So kann beispielsweise der Ausbau dezentraler Energieerzeugungs- und Ladeinfrastrukturen entlang von Autobahnen grundsätzlich zusätzliche Energieversorgungsstrukturen schaffen. [16] Leistungsfähigere Netzanschlüsse und Versorgungseinrichtungen an Autobahnen könnten grundsätzlich auch angrenzende Baustellen versorgen.

Gleichzeitig entstehen durch die zunehmende Elektrifizierung von Verkehr, Straßeninfrastruktur und Baustellen zusätzliche und teilweise konkurrierende Leistungsanforderungen. Zugänglichkeit, Anschlussleistung und räumliche

Ausgestaltung müssen daher auf die Anforderungen der eingesetzten Bau- und Transportmaschinen abgestimmt werden.

**Konsequenzen für Ausschreibung und Bewertung**

Die Ergebnisse der Literaturrecherche zeigen, dass auch die Rahmenbedingungen von Ausschreibung und Beschaffung für die Umsetzung emissionsärmerer Bauweisen von Bedeutung sind. In der Literatur wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass politische Maßnahmen und Beschaffungsstrategien auf die Dekarbonisierung des Straßenbaus ausgerichtet werden sollten. [3] gleichzeitig werden zunehmende Nachhaltigkeitsanforderungen, insbesondere bezogen auf die Emissionsreduktion, an Maschinenflotten bei öffentlichen Projekten beschrieben. [13]

Für das Elektrifizierungskonzept ergibt sich daraus die Anforderung, Nachhaltigkeits- und Emissionsaspekte in Ausschreibungs- und Vergabeverfahren nachvollziehbar bewertbar zu machen. Dafür sind transparente Bewertungsverfahren und geeignete Kriterien erforderlich, mit denen elektrische und emissionsarme Maschinen-, Versorgungs- und Betriebskonzepte verglichen werden können. Neben Beschaffungs- und Betriebskosten sollten insbesondere Energieverbrauch, $CO_2$-Emissionen, Infrastrukturaufwand und gegebenenfalls Lebenszykluswirkungen in die Bewertung einfließen.

Die abgeleiteten Anforderungen bilden die fachliche Grundlage für die weitere Entwicklung des VoltaVia-Elektrifizierungskonzepts. Im weiteren Projektverlauf sind Maschinen- und Versorgungslösungen szenarienbezogen zusammenzuführen und hinsichtlich ihrer technischen, energetischen, wirtschaftlichen und organisatorischen Umsetzbarkeit zu bewerten.

Die Literaturanalyse hat neben den unmittelbaren Erkenntnissen zur Elektrifizierung von Großbaustellen weitere wesentliche Handlungsfelder identifiziert, die für eine ganzheitliche Bewertung nachhaltiger Straßenbauprojekte berücksichtigt werden müssen (Abbildung 7). Diese betreffen insbesondere den Einsatz erneuerbarer Energien, die Bilanzierung von $CO_2$-Emissionen, die Materialbereitstellung sowie die Lebenszyklusbetrachtung von Infrastrukturprojekten.

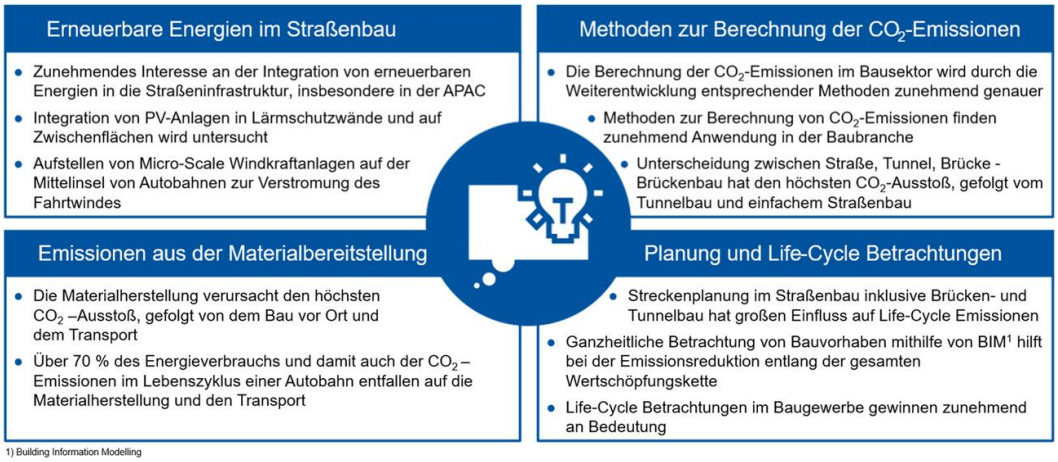



*Abbildung 7: Weiterführende Erkenntnisse aus der Analyse.*

### Erneuerbare Energien im Straßenbau

Die Literatur zeigt Potenziale für die Integration erneuerbarer Energien in die Energieversorgung von Straßeninfrastrukturen. Insbesondere Photovoltaikanlagen können dabei mit lokalen Energiebedarfen entlang der Verkehrsinfrastruktur verknüpft werden. [16] Batteriespeicher stellen eine ergänzende Möglichkeit dar, Erzeugung und Verbrauch zeitlich aufeinander abzustimmen. [10]

Außerdem wird darauf hingewiesen, dass insbesondere die Kombination aus lokal erzeugter Energie und Energiespeichersystemen erhebliche Potenziale zur Emissionsreduktion bietet. [17]

Für ein Elektrifizierungskonzept sind erneuerbare Energieerzeugung, Netzanschluss, Speicher und Energiebedarf daher möglichst gemeinsam zu betrachten. Daraus ergibt sich die Anforderung, die Integration erneuerbarer Energien bereits in der Planungsphase zu berücksichtigen und Netzanschlüsse, Lastprofile und Energiebedarfe aufeinander abzustimmen.

### Methoden zur Berechnung der $CO_2$-Emissionen

Ein weiterer Schwerpunkt betrifft die Erfassung und Bewertung von Treibhausgasemissionen. Die untersuchten Studien verdeutlichen, dass die Ergebnisse von Emissions- und Lebenszyklusanalysen wesentlich von der gewählten Datengrundlage und den festgelegten Systemgrenzen abhängen können. Die Systemgrenzen bestimmen dabei, welche Prozesse und Bestandteile eines Straßenbauprojekts in die Bilanzierung einbezogen werden. Wird beispielsweise ausschließlich der Straßenoberbau betrachtet, bleiben Emissionen aus weiteren Projektbestandteilen wie Erdarbeiten, Ingenieurbauwerken oder

zusätzlichen Transport- und Bauprozessen unberücksichtigt. Entsprechend können die ermittelten Gesamtemissionen deutlich niedriger ausfallen als bei einer Betrachtung des vollständigen Straßenbauprojekts. [18] Darüber hinaus zeigen Lebenszyklusanalysen, dass sich die Umweltbewertung von Straßenbauprojekten nicht ausschließlich auf Treibhausgasemissionen beschränken muss, sondern weitere Umwelt- und Gesundheitswirkungen berücksichtigen kann. [15]

Für eine Vergleichbarkeit unterschiedlicher Projekte und Technologiekonzepte sind daher transparente und möglichst einheitliche Berechnungs- und Bilanzierungsansätze erforderlich. Dabei sollten sowohl direkte Emissionen aus dem Baustellenbetrieb als auch relevante vorgelagerte Emissionen aus Energieversorgung, Transport und Materialbereitstellung berücksichtigt werden.

**Emissionen aus der Materialbereitstellung**

Die Analyse verdeutlicht, dass ein erheblicher Anteil der Gesamtemissionen von Infrastrukturprojekten nicht während der Bauausführung, sondern bereits in der Herstellung und Bereitstellung der eingesetzten Materialien entsteht. [18] [20]

Besonders energieintensive Baustoffe wie Asphalt, Beton und Stahl weisen hohe vorgelagerte Emissionen auf. Daher besteht ein großes Potenzial zur Emissionsreduzierung durch den Einsatz alternativer Baustoffe, Recyclingmaterialien und ressourcenschonender Herstellungsverfahren. [3] [20]

Vor diesem Hintergrund sollten Materialemissionen künftig stärker in die Projektbewertung einbezogen und die Bewertung nicht ausschließlich auf die Emissionen des Baustellenbetriebs fokussiert werden. [19] [20]

**Planung und Life-Cycle-Betrachtungen**

Ein zentrales Ergebnis der Literaturrecherche ist die Bedeutung von Lebenszyklusanalysen für die Bewertung nachhaltiger Straßenbauprojekte. Die untersuchten Veröffentlichungen zeigen, dass eine isolierte Betrachtung der Bauphase nicht ausreicht, um die tatsächlichen Umweltwirkungen eines Projekts zu bewerten. Vielmehr müssen Planung, Bau, Betrieb, Instandhaltung und Rückbau als zusammenhängender Lebenszyklus betrachtet werden. [21] [23]

Lebenszyklusanalysen ermöglichen es dadurch, Umweltwirkungen über verschiedene Projektphasen hinweg zu erfassen und langfristige ökologische Optimierungspotenziale zu identifizieren. Gleichzeitig können entsprechende Bewertungsansätze bereits in frühen Planungsphasen eingesetzt werden, um die Umweltwirkungen unterschiedlicher Lösungen in die Entscheidungsfindung einzubeziehen. [19] Dadurch können Entscheidungen unterstützt werden, die

nicht ausschließlich auf kurzfristige Emissionsreduktionen während der Bauausführung ausgerichtet sind, sondern die Auswirkungen über den gesamten Lebenszyklus berücksichtigen.

**Zusammenfassende Bewertung**

Die weiterführenden Erkenntnisse machen deutlich, dass die Elektrifizierung von Großbaustellen nur einen Baustein einer umfassenden Transformationsstrategie darstellt. Für eine nachhaltige Gestaltung zukünftiger Straßenbauprojekte müssen Energieversorgung, Emissionsbilanzierung, Materialeinsatz und Lebenszyklusbetrachtungen integriert betrachtet werden. Aus der Zusammenführung der Literaturergebnisse ergibt sich, dass insbesondere die Verknüpfung dieser Themenfelder erforderlich ist, um langfristige Emissionsminderungen zu ermöglichen, einen Beitrag zur Erreichung der Klimaziele zu leisten und belastbare Entscheidungsgrundlagen für Planung, Vergabe und Betrieb zu schaffen.

## 2.2 Analyse Stand der Elektrifizierung (AP 2.2)

### 2.2.1 Experteninterviews (Methodik)

Die Experteninterviews bildeten einen zentralen Baustein zur Beantwortung der Forschungsfragen. Ziel war es, den aktuellen Entwicklungsstand sowie die zukünftigen Perspektiven der Elektrifizierung von Baumaschinen und deren Einsatz auf Großbaustellen praxisnah zu bewerten. Im Fokus standen technische, wirtschaftliche und organisatorische Fragestellungen, insbesondere hinsichtlich Maschinenverfügbarkeit, Energieversorgung, Infrastruktur und Marktentwicklung. Hierzu wurden insgesamt 12 Baumaschinenhersteller sowie 11 Straßenbauunternehmen anhand strukturierter, etwa einstündiger Interviews befragt, (siehe Tabelle 2).

| Experteninterviews | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Baumaschinenhersteller | | | Straßenbauunternehmen | | |
| 1. | Bomag GmbH | BOMAG | 1. | Bickardt Bau SE | bickhardt bau |
| 2. | Dynapac GmbH | DYNAPAC | 2. | Eiffage Infra-Bau SE | EIFFAGE |
| 3. | Günter Papenburg AG | GP PAPENBURG | 3. | GP Günter Papenburg AG | GP PAPENBURG |
| 4. | Hamm AG & Wirtgen GmbH | WIRTGEN GROUP | 4. | Johann Bunte Bauunternehmung SE & Co. KG | BUNTE |
| 5. | JCB Deutschland GmbH | JCB | 5. | W. Markgraf GmbH & Co KG | MARKGRAF |
| 6. | Joseph Vögele AG | VÖGELE | 6. | Max Streicher GmbH & Co. KG aA | STREICHER |
| 7. | Jungheinrich Vertrieb Deutschland AG & Co. KG | JUNGHEINRICH | 7. | Peter Gross Infrastruktur GmbH & Co. KG | PETER GROSS BAU |
| 8. | Manitou Deutschland GmbH | MANITOU | 8. | SAW Schleswiger Asphaltsplitt-Werke GmbH & Co. KG | SAW |
| 9. | Skyjack | SKYJACK | 9. | Schleith GmbH Baugesellschaft | SCHLEITH BAUT. |
| 10. | Wacker Neusson SE | WACKER NEUSON | 10. | Strabag SE | STRABAG |
| 11. | Zeppelin Baumaschinen GmbH / Caterpillar | ZEPPELIN CAT | 11. | J. Friedrich Storz Verkehrswegebau GmbH & Co. KG | STORZ |
| 12. | Zeppelin Power Systems GmbH | ZEPPELIN Power Systems CAT | | | |

*Tabelle 2: Übersicht Teilnehmer an Experteninterviews*

Die Gespräche erfolgten auf Basis standardisierter Leitfäden, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse sicherzustellen. Die Auswertung erfolgte themenbezogen, indem inhaltlich zusammenhängende Aussagen zu zentralen Erkenntnissen verdichtet wurden. Die Interviews ergänzen die Literatur- und Marktrecherche um praxisorientierte Perspektiven und bilden eine wichtige Grundlage für die Entwicklung des Elektrifizierungskonzepts im Projekt VoltaVia. Die vollständigen Interviewleitfäden sind im Anhang 1 & 2 enthalten.

**Herangehensweise bei den Interviews**

Die Interviews richteten sich an **Vertreter von Straßenbauunternehmen**, die Baumaschinen und Baugeräte im praktischen Baustellenbetrieb einsetzen. Ziel war es, die technischen, wirtschaftlichen und organisatorischen

Anforderungen an elektrifizierte Maschinen aus Anwendersicht zu erfassen und deren Einsatzfähigkeit unter realen Baustellenbedingungen einzuordnen (Abbildung 8). Im Mittelpunkt standen:

- Einsatzpotenziale batterieelektrischer …
- …und wasserstoffbasierter Maschinen
- Geeignete Maschinen- und Gerätegruppen für die Elektrifizierung
- Anforderungen an Energieversorgung und Ladeinfrastruktur
- Wirtschaftlichkeit und betriebliche Auswirkungen
- Sicherheits-, Logistik- und Schulungsanforderungen
- Erwartungen an Markt-, Preis- und Technologieentwicklung
- Auswirkungen von Regulierung, Förderprogrammen, Ausschreibungen

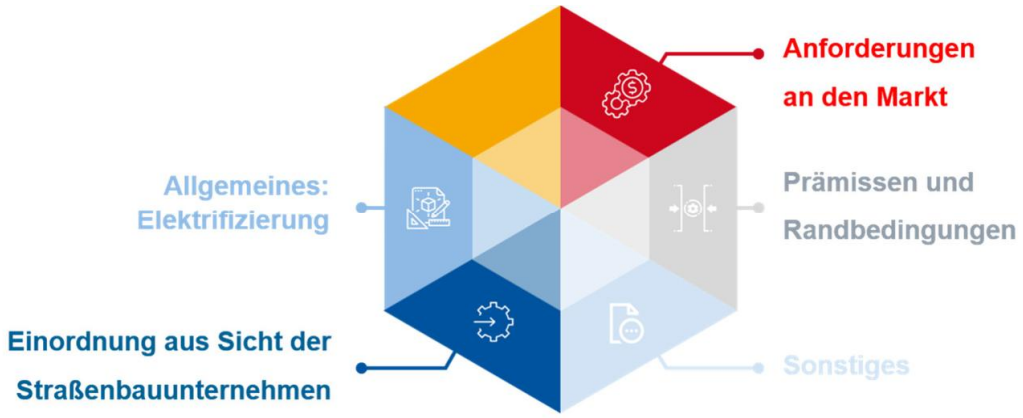



*Abbildung 8: Übersicht der Herangehensweise bei den Interviews mit Straßenbauunternehmen*

Die **Herstellerinterviews** richteten sich an Unternehmen, die Baumaschinen und zugehörige Antriebs- beziehungsweise Energiesysteme entwickeln oder produzieren (Abbildung 9). Ziel war es, den technischen Entwicklungsstand alternativer Antriebskonzepte, deren Integrationsmöglichkeiten in unterschiedliche Baumaschinentypen sowie die aus Herstellersicht zu erwartende Markt- und Kostenentwicklung zu erfassen. Schwerpunkte waren:

- Relevante Antriebstechnologien und Energieträger
- Geeignete Maschinen- und Leistungsklassen
- Technische Integrationsanforderungen und Plattformkonzepte
- Energiebedarf und typische Lastprofile
- Kostenentwicklung und Wirtschaftlichkeit
- Regulatorische Rahmenbedingungen
- Anforderungen an Infrastruktur und Markthochlauf

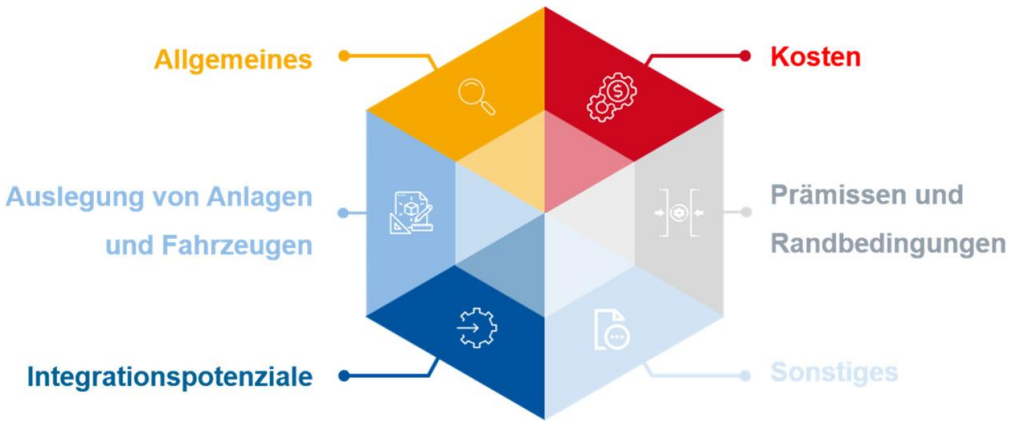



*Abbildung 9: Übersicht der Herangehensweise bei den Herstellerinterviews*

### 2.2.2 Ergebnisse der Interviews mit Straßenbauunternehmen

Die Interviews mit Straßenbauunternehmen dienten dazu, die technischen, wirtschaftlichen und organisatorischen Anforderungen an elektrifizierte Maschinen und Versorgungssysteme aus der Perspektive des praktischen Baustellenbetriebs zu erfassen. Die nachfolgend thematisch zusammengefassten Ergebnisse bilden eine Grundlage für die Ableitung von Anforderungen an das Elektrifizierungs- und Infrastrukturkonzept.

**Wie ordnen Straßenbauunternehmen das Thema Elektrifizierung grundsätzlich ein?** Straßenbauunternehmen betrachten Elektrifizierung als wichtigen Bestandteil einer nachhaltigen Baustelle, erwarten jedoch keinen vollständigen Ersatz aller heutigen Technologien durch eine einzige Alternative. Stattdessen wird ein technologieoffener Mix erwartet. Batterieelektrische Lösungen eignen sich vor allem für kleine Maschinen, stationäre Anwendungen und innerstädtische Baustellen. Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien werden für größere Maschinen und hohe Leistungsanforderungen als perspektivisch relevant angesehen.

**Welche Vorteile erwarten Straßenbauunternehmen von emissionsfreien Antrieben in Baumaschinen?** Die wichtigsten Vorteile liegen in der Reduktion von Lärm und lokalen Schadstoffen. Dadurch können Arbeitsschutz, Aufenthaltsqualität auf der Baustelle und Akzeptanz bei Anwohnern verbessert werden. Zusätzlich werden geringere Wartungsaufwände, einfachere Bedienbarkeit und Effizienzgewinne durch den Wegfall des Standbetriebs genannt.

**Welche Hemmnisse begrenzen die Einführung elektrifizierter Lösungen?** Zentrale Hemmnisse sind hohe Anschaffungskosten, unzureichende Lade- und Energieinfrastruktur, lange Ladezeiten, begrenzte Einsatzdauer und Unsicherheiten bei extremen Außentemperaturen. Hinzu kommen Transport- und

Sicherheitsfragen, beispielsweise bei größeren Mengen von Akkus oder Wasserstofftanks, sowie organisatorische Herausforderungen bei mehreren Energieträgern.

**Welche Anforderungen stellen Straßenbauunternehmen als Nutzer von Baumaschinen an den Markt?** Straßenbauunternehmen wünschen sich praktikable, robuste und wirtschaftliche Lösungen, die im Baustellenbetrieb funktionieren. Dazu gehören mobile Energiespeicher, $CO_2$-neutrale Stromversorgung vor Ort, flexible Ladeinfrastruktur, solarbasierte Optionen für Container und abgelegene Baustellen sowie stärkere Recyclingmöglichkeiten für Akkus und Baumaterialien.

**Welche Rolle spielen Regulierung, Ausschreibungen und Förderprogramme?** Regulatorische Vorgaben, Zertifizierungen, spezifische Ausschreibungen und Förderprogramme werden als zentrale Treiber bewertet. Ohne externe Anreize bleibt die Wettbewerbsfähigkeit elektrifizierter Maschinen begrenzt. Ausschreibungen, die klimaneutrale oder emissionsarme Technologien berücksichtigen, können die Einführung beschleunigen.

**Welche ergänzenden Aspekte wurden genannt?** Neben Maschinen rücken Baucontainer, Wohnraumsysteme, Aufenthaltsbereiche, Sanitäranlagen und Generatoren in den Fokus. Potenziale werden in besserer Dämmung, optimierter Klimatechnik, reduziertem Strombedarf, Maschine Sharing und standardisierten Austauschakkus gesehen. Nachhaltige Baustellen müssen daher als Gesamtsystem verstanden werden.

### 2.2.3 Ergebnisse der Interviews mit Baumaschinenherstellern

Die Baumaschinenherstellerinterviews dienten dazu, den technischen Entwicklungsstand, die derzeitige Marktverfügbarkeit und die erwarteten Entwicklungspfade emissionsärmerer Baumaschinen aus Herstellersicht einzuordnen. Darüber hinaus wurden technische Integrationsfragen, wirtschaftliche Rahmenbedingungen sowie regulatorische und infrastrukturelle Voraussetzungen betrachtet. Die wesentlichen Ergebnisse werden nachfolgend thematisch zusammengefasst.

**Wie bewerten Baumaschinenhersteller die strategische Bedeutung der Elektrifizierung?** Baumaschinenhersteller messen der Elektrifizierung bereits heute hohe strategische Bedeutung bei. Gleichzeitig verfolgen sie einen technologieoffenen Ansatz. Batterieelektrische Maschinen, HVO (Hydrotreated Vegetable Oil, synthetischer Dieselkraftstoff), E-Fuels, Wasserstoffmotoren und Brennstoffzellen werden als Bausteine eines differenzierten Transformationspfads betrachtet.

**Welche Maschinenklassen eignen sich besonders für batterieelektrische Antriebe?** Der Schwerpunkt liegt derzeit bei kleinen und mittleren Anwendungen, insbesondere bei Maschinen bis etwa zehn Tonnen beziehungsweise bis rund 100 kW Leistung. Baumaschinenhersteller verweisen auf reale Lastprofile und Telemetriedaten, die zeigen, dass viele Maschinen im Arbeitsalltag kürzer oder weniger intensiv genutzt werden, als von Straßenbauunternehmen teilweise angenommen wird.

**Welche Bedeutung hat Wasserstoff?** Wasserstoff wird vor allem langfristig für große, energieintensive oder netzferne Anwendungen gesehen. Kurzfristig wird der Wasserstoffverbrennungsmotor teilweise als robuster und kundennäher eingeschätzt als die Brennstoffzelle. Brennstoffzellen gelten besonders für stationäre Hochleistungsanwendungen und Generatoren als interessant.

**Welche technischen Integrationsfragen bestehen?** Alternative Antriebe erfordern teilweise neue Plattformen, größere Chassis oder flexible Maschinenarchitekturen. Herausforderungen liegen in Bauraum, Kühlung, Temperaturregulierung, Batteriekapazität, zusätzlichem Gewicht, Staub, Vibrationen und Luftqualität. Flexible Chassis können helfen, Technologieoffenheit länger zu erhalten.

**Wie bewerten Baumaschinenhersteller die Kostenentwicklung?** Aktuell liegen Anschaffungskosten alternativer Antriebe über denen konventioneller Maschinen. Gleichzeitig werden geringere Wartungskosten und langfristig bessere Lebenszykluskosten erwartet. Kostenparität hängt aus Herstellersicht stark von Stückzahlen, Energiepreisen, Förderung, Infrastruktur und regulatorischen Rahmenbedingungen ab.

**Welche regulatorischen Bedingungen werden benötigt?** Baumaschinenhersteller fordern klarere Normen für Transport, Lagerung und Recycling von Batterien sowie für Wasserstofftankstellen. Fragmentierte internationale Vorgaben bremsen die Entwicklung. Gewünscht werden technologieoffene $CO_2$-Ziele, einfache Förderprogramme, einheitlichere Normung und Ausschreibungskriterien, die emissionsarme Maschinen berücksichtigen.

**Welche weiteren Maßnahmen können die Marktdurchdringung unterstützen?** Demonstrationsprojekte und Schaubaustellen werden als wirksame Instrumente genannt, um Praxistauglichkeit sichtbar zu machen und Akzeptanz aufzubauen. Außerdem gewinnen Telemetriedaten, intelligente Maschinensteuerung, dynamische Ladesysteme und differenzierte Infrastrukturkonzepte für verschiedene Baustellentypen an Bedeutung.

### 2.2.4 Zusammenfassende Einordnung und Implikationen aus den Experteninterviews

Die Interviews mit Straßenbauunternehmen und Baumaschinenherstellern zeigen, dass ein technologieoffenes Elektrifizierungskonzept erforderlich ist, das die jeweiligen Einsatzprofile berücksichtigt. Die Auswahl geeigneter Antriebs- und Versorgungslösungen muss sich insbesondere am Maschinentyp, dem tatsächlichen Lastprofil, dem Energiebedarf, der Einsatzdauer, der erforderlichen Mobilität sowie den örtlichen Versorgungsbedingungen orientieren. Reale Betriebs- und Telemetriedaten bilden hierfür eine wesentliche Planungsgrundlage. Die zentralen Aussagen beider Interviewgruppen und die daraus resultierenden Schlussfolgerungen für VoltaVia sind in Tabelle 3 gegenübergestellt.

Die Gegenüberstellung zeigt insbesondere, dass die Elektrifizierung von Großbaustellen nicht allein über die Verfügbarkeit geeigneter Maschinen erreicht werden kann. Eine zentrale Voraussetzung ist eine mobile, flexible und modular erweiterbare Energieversorgung, die neben den Baumaschinen auch Speicher, Stromerzeuger und weitere Baustelleneinrichtungen berücksichtigt. Die eingesetzten Lösungen müssen zugleich unter baustellentypischen Umweltbedingungen zuverlässig funktionieren und in bestehende Arbeits-, Transport- und Logistikprozesse integrierbar sein.

Für den Markthochlauf sind neben der technischen Weiterentwicklung insbesondere verlässliche wirtschaftliche und regulatorische Rahmenbedingungen erforderlich. Technologieoffene Ausschreibungs- und Förderkriterien, die sich an der erreichbaren $CO_2$-Minderung orientieren, können Nachfrage und Investitionssicherheit schaffen. Ergänzend sollten die entwickelten Maschinen- und Versorgungskonzepte auf Pilot- und Demonstrationsbaustellen unter realen Einsatzbedingungen validiert werden.

*Tabelle 3: Einordnung der Interviews mit Straßenbauunternehmen & Baumaschinenherstellern*

| Themenfelder | Perspektive der Straßenbauunternehmen | Perspektive der Baumaschinenhersteller | Ableitung für die Elektrifizierung von Straßenabustellen |
|---|---|---|---|
| **Allgemeine technologische Einordnung** | Technologiemix; Batterie für kleinere, Wasserstoff perspektivisch für größere Anwendungen | Technologieoffener Transformationspfad; HVO und batterieelektrische Lösungen kurzfristig, Wasserstoff perspektivisch | Technologieoffene und einsatzbezogene Auswahl |
| **Auslegung und Einsatz-anforderungen** | Einsatzdauer, Leistungsbedarf, Mobilität und Praxistauglichkeit sind entscheidend | Reale Lastprofile und Telemetriedaten bilden die Grundlage der Auslegung | Dimensionierung anhand tatsächlicher Betriebsdaten |
| **Technische Integrations-potenziale** | Robuste, einfach bedienbare und integrierbare Lösungen erforderlich | Anpassungen an Chassis, Bauraum, Kühlung und Maschinenarchitektur können erforderlich sein | Technische Integration und Umgebungsbedingungen frühzeitig berücksichtigen |
| **Kosten, Markt-bedingungen und regulatorische Anreize** | Hohe Kosten, fehlende Infrastruktur und geringe Planungssicherheit hemmen Investitionen | Kostensenkungen werden durch Stückzahlen, geringere Wartungs-kosten und verlässliche Nachfrage erwartet | Gesamtkosten betrachten und Nachfrage über Vergabe schaffen |
| **Prämissen, Infrastruktur und betriebliche Rand-bedingungen** | Mobile, flexible und zuverlässige Energieversorgung erforderlich | Unterschiedliche Baustellentypen benötigen angepasste Infrastrukturkonzepte | Modulare und baustellentypspezifische Versorgungskonzepte |
| **Weitere Aspekte und Maßnahmen** | Förderprogramme, Ausschreibungen und Zertifizierungen unterstützen die Einführung | Normung, Demonstrationsprojekte und Schulungen fördern die Marktdurchdringung | Technologieoffene Kriterien und praktische Erprobung erforderlich |

## 2.3 Trendanalyse der Gerätetechnik (AP 2.3)

Aufbauend auf der Analyse des aktuellen Entwicklungsstands sowie den Ergebnissen der Experteninterviews erfolgt eine Trendanalyse der Geräte- und Antriebstechnik. Ziel ist es, Technologien zeitlich einzuordnen und abzuleiten, welche Maschinen- und Fahrzeugklassen kurz-, mittel- und langfristig für eine Elektrifizierung geeignet sind. Die Analyse basiert auf einem technologieoffenen Transformationspfad. Dabei werden batterieelektrische Antriebe, wasserstoffbasierte Lösungen, alternative Kraftstoffe sowie unterschiedliche Energieversorgungskonzepte berücksichtigt. Neben den Maschinen selbst werden auch Energieversorgung, Speicher- und Ladelösungen sowie weitere energieverbrauchende Bestandteile des Baustellensystems betrachtet.

### 2.3.1 Methodik der Trendanalyse

Die Trendanalyse der Gerätetechnik baut auf zwei sich ergänzenden Betrachtungsperspektiven auf. Einerseits werden die Erkenntnisse aus den Experteninterviews einbezogen, diese bilden die praktische Perspektive des Marktes ab und zeigen, welche Anforderungen, Hemmnisse, Entwicklungsziele und Einsatzgrenzen aus Sicht der Straßenbau- und Baumaschinenherstellerunternehmen bestehen (Abbildung 10). Andererseits wird eine wissenschaftliche Methodik zur Priorisierung der Elektrifizierung herangezogen. Dabei wird bewertet, bei welchen Maschinen- und Fahrzeugklassen eine Elektrifizierung insbesondere im Hinblick auf die Minderung von $CO_2$-Emissionen einen hohen Nutzen erwarten lässt. Diese methodische Bewertung ergänzt die Interviewergebnisse um eine theoretische, emissionsbezogene Perspektive.

Die Kombination beider Ansätze bildet die Grundlage für die nachfolgende Trendanalyse der Gerätetechnik. Durch die Verknüpfung von Markt- und Herstellerperspektive mit einer wissenschaftlichen Prioritätsbewertung können sowohl die praktische Umsetzbarkeit als auch das potenzielle Wirkungspotenzial einzelner Maschinen- und Fahrzeugklassen berücksichtigt werden.

Zur Bewertung der Elektrifizierungspriorität einzelner Maschinen- und Fahrzeugklassen wird eine parametergestützte Bewertungsmethodik angewendet. Ziel ist es, diejenigen Gerätekategorien zu identifizieren, bei denen eine Elektrifizierung unter Berücksichtigung technischer, wirtschaftlicher und betrieblicher Kriterien besonders relevant erscheint. Die Methodik ergänzt die Erkenntnisse aus den Interviews um eine systematische und vergleichbare Bewertung der betrachteten Geräteklassen.

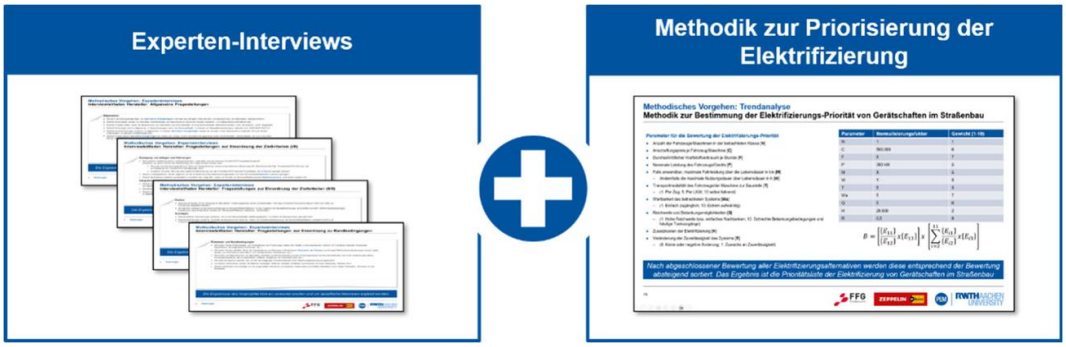



*Abbildung 10: Kombinatorischer Ansatz zur Voraussage zukünftiger Trends*

Für jede Geräteklasse werden zunächst verschiedene Bewertungsparameter erfasst. Diese umfassen unter anderem die Anzahl der Fahrzeuge bzw. Maschinen in der betrachteten Klasse, den Anschaffungspreis, den durchschnittlichen Kraftstoffverbrauch, die nominale Leistung sowie die maximale Fahrleistung bzw. Nutzungsdauer über die Lebensdauer. Zusätzlich werden baubetriebliche und technische Einflussgrößen berücksichtigt. Hierzu zählen insbesondere die Transportmodalität zur Baustelle, die Wartbarkeit des Systems, Reichweite und Betankungsmöglichkeiten, mögliche Zusatzkosten der Elektrifizierung sowie die Veränderung der Zuverlässigkeit des Systems. Da die einzelnen Bewertungsparameter unterschiedliche Einheiten und Wertebereiche aufweisen, werden die Ausgangswerte zunächst mithilfe definierter Bezugswerte normalisiert. Die normalisierten Parameterwerte werden anschließend entsprechend ihrer Bedeutung gewichtet und zu einem Gesamtbewertungswert zusammengeführt Die verwendeten Parameter, Normalisierungsfaktoren und Gewichtungen sind in Tabelle 4 dargestellt. Die Berechnung erfolgt gemäß Gleichung 1:

$$B = \left[\frac{\{E_{11}\}}{\{E_{12}\}} x \{E_{13}\}\right] x \left[\sum_{i=2}^{11} \frac{\{E_{11}\}}{\{E_{12}\}} x \{E_{13}\}\right] \quad (1)$$

mit:

- $E_{i1}$: $Parameterwert$
- $E_{i2}$: $Normalisierungsfaktor$
- $E_{i3}$: $Gewichtungsfaktor$

Anschließend wird für jede betrachtete Maschinen- bzw. Fahrzeugklasse ein Bewertungswert ermittelt. Nach Abschluss der Bewertung werden die Elektrifizierungsalternativen entsprechend ihrem Bewertungswert absteigend sortiert. Das Ergebnis ist eine Prioritätsliste, die aufzeigt, bei welchen Gerätekategorien eine Elektrifizierung aus methodischer Sicht vorrangig betrachtet werden sollte.

*Tabelle 4: Methodik zur Bestimmung der Elektrifizierungs-Priorität von Gerätschaften im Straßenbau; Angelehnt an Abul Masrur [68]; 1) Faktoren für das Angleichen der stark variierenden Wertebereiche, um die Gewichtung der Parameter zu vereinheitlichen*

| Parameter | Bedeutung | Normalisierungsfaktor / Bezugswert [1)] | Gewichtung (1-10) |
|---|---|---|---|
| N | Anzahl der Fahrzeuge/Maschinen in der betrachteten Klasse | 1 | 1 |
| C | Anschaffungspreis je Fahrzeug/Maschine | 500.000 | 6 |
| F | Durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch je Stunde | 8 | 7 |
| P | Nominale Leistung des Fahrzeugs/Geräts | 300 kW | 5 |
| M | Falls anwendbar, maximale Fahrleistung über die Lebensdauer in km | X | 5 |
| W | - Andernfalls die maximale Nutzungsdauer über Lebensdauer in h | Y | 5 |
| T | Transportmodalität des Fahrzeugs/der Maschine zur Baustelle - (1: Per Zug; 5: Per LKW; 10 selbst fahrend) | 5 | 5 |
| Wa | Wartbarkeit des betrachteten Systems - (1: Einfach zugänglich; 10: Extrem aufwändig) | 5 | 7 |
| Q | Reichweite und Betankungsmöglichkeiten (1: Hohe Reichweite bzw. einfaches Nachtanken; 10: Schlechte Betankungsbedingungen und häufige Tankvorgänge) | 5 | 6 |
| H | Zusatzkosten der Elektrifizierung | 20000 | 2 |
| R | Veränderung der Zuverlässigkeit des Systems – (0: Keine oder negative Änderung; 1: Zuwachs an Zuverlässigkeit) | 0,5 | 8 |

### 2.3.2 Ergebnisse der Trendanalyse

Die Trendanalyse führt die Erkenntnisse aus Literaturrecherche, Experteninterviews und wissenschaftlicher Prioritätsbewertung zusammen. Ziel ist es, die zukünftige Entwicklung der Antriebstechnologien im Straßenbau einzuordnen und die Elektrifizierungspriorität einzelner Maschinen- und Fahrzeugklassen abzuleiten Abbildung 11). Die Literatur zeigt, dass batterieelektrische Antriebe derzeit vor allem für kleine und mittlere Maschinen geeignet sind. Für größere und besonders energieintensive Anwendungen werden Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien als langfristige Option diskutiert. Kabelgebundene Lösungen können bei stationären Großgeräten eine wirtschaftliche Alternative darstellen. HVO wird überwiegend als kurzfristige Übergangslösung zur Emissionsminderung betrachtet, nicht jedoch als langfristig emissionsfreie Technologie. Die Experteninterviews bestätigen dieses Bild. Kurz- bis mittelfristig ist vor allem dort eine Elektrifizierung zu erwarten, wo die technische Umsetzung bereits möglich und eine ausreichende Marktnachfrage vorhanden ist. Die wissenschaftliche Priorisierung bewertet dagegen insbesondere Maschinen mit hohen Stückzahlen, langen Einsatzzeiten und hohem Kraftstoffverbrauch als besonders relevant, da hier das größte $CO_2$-Minderungspotenzial besteht.

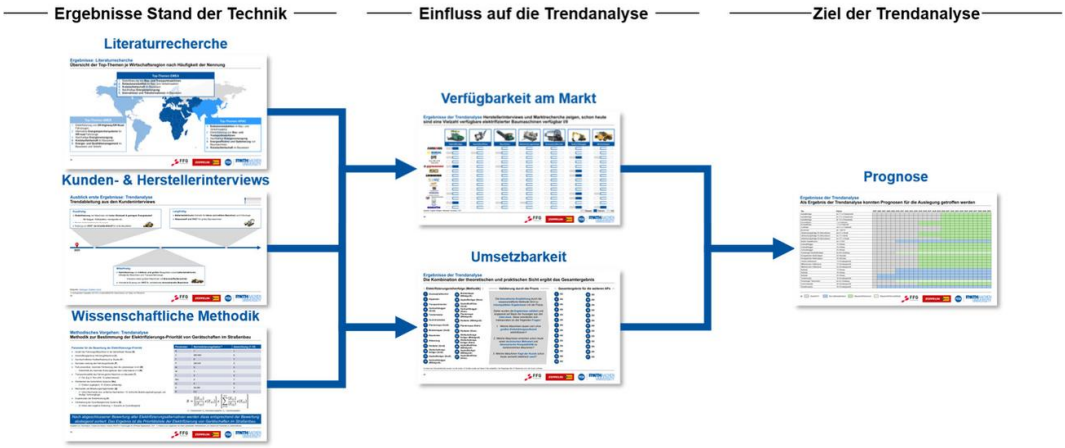



*Abbildung 11: Die Trendanalyse baut auf dem Stand der Technik auf*

Daraus ergibt sich, dass praktische Umsetzbarkeit und theoretisches Emissionsminderungspotenzial nicht immer zur gleichen Priorisierung führen. Für die Bewertung zukünftiger Entwicklungspfade wurden daher beide Perspektiven zusammengeführt und gegenseitig validiert. Grundsätzlich ist nicht davon auszugehen, dass sich eine einzelne Antriebstechnologie für alle Maschinenklassen durchsetzt. Vielmehr zeichnet sich ein technologieoffener Technologiemix aus batterieelektrischen Antrieben, wasserstoffbasierten Lösungen,

kabelgebundenen Systemen sowie Übergangslösungen auf Basis von HVO ab. Die Wahl der Technologie hängt dabei maßgeblich vom Einsatzprofil, Leistungsbedarf und den jeweiligen Baustellenrandbedingungen ab.

### Marktverfügbarkeit elektrifizierter Maschinen

Die Analyse der aktuellen Marktverfügbarkeit zeigt, dass dieselbetriebene Maschinen weiterhin in sämtlichen betrachteten Geräteklassen verfügbar sind und den heutigen Referenzzustand darstellen (Abbildung 12). **Elektrische Antriebe** sind bereits für einen großen Teil der Maschinenklassen verfügbar. Einschränkungen bestehen jedoch weiterhin bei einzelnen Spezialmaschinen und besonders leistungsintensiven Anwendungen, beispielsweise Asphaltfräsen, Beschickern oder Gleitschalungsfertigern. **Wasserstoffbasierte Maschinen** befinden sich hingegen überwiegend noch im Pilot- und Demonstrationsstadium. Sie verfügen aktuell nur über eine begrenzte Marktverfügbarkeit, können jedoch langfristig insbesondere für große und energieintensive Maschinen an Bedeutung gewinnen.




*Abbildung 12: Einordnung der eingesetzten Maschinen und Fahrzeuge nach verfügbarer Antriebstechnologie für das Betrachtungsjahr 2027 (eigene Darstellung, basierend auf den Herstellerinterviews und der Marktrecherche).*

### Datengrundlage und Priorisierung

Zur weiteren Analyse wurden die Ergebnisse aus Literaturrecherche, Marktanalyse und Experteninterviews in einer gemeinsamen Excel-basierten Datengrundlage zusammengeführt. Hierzu wurden die in Abbildung 13 dargelegten Annahmen getroffen, um eine Priorisierung gemäß der Methodik zu ermöglichen.

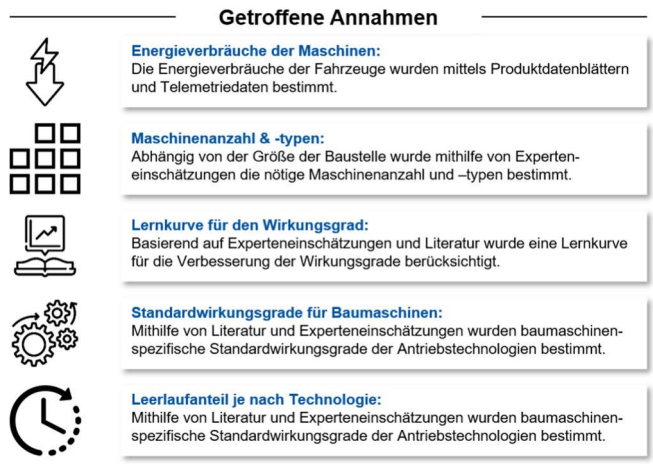



*Abbildung 13a: Die Herleitung und Ergebnisse der Trendanalyse wurden in einer Excel dokumentiert*




*Abbildung 13b: Elektrifizierungsreihenfolge nach der Methodik*

Die Energiebedarfe der betrachteten Maschinen wurden anhand von Herstellerdaten, Produktdatenblättern, Telemetriedaten und Experteneinschätzungen ermittelt.

Für die Betrachtungsjahre 2027, 2040 und 2050 wurden zusätzlich technologische Lernkurven und Wirkungsgradsteigerungen angenommen. Die Jahre wurden dabei bewusst als drei Referenzpunkte gewählt: 2027 steht für einen „nahen" Zeitpunkt, der dem heutigen Stand der Technik entspricht. 2040 markiert das Zieljahr der Klimaneutralität. 2050 steht als „weit entfernter" Zeitpunkt für eine langfristige Perspektive, in der sich die Technologien deutlich weiterentwickelt haben können. Für die Lerneffekte wurde ein linearer Verlauf pro Jahr angenommen, der sich nach Antriebsart unterscheidet. Diesel-Antriebe erreichen demnach eine jährliche Verbesserung von 0,5 %, batterieelektrische Antriebe von 1 %, Brennstoffzellen von 1,5 % und Wasserstoffverbrennungsmotoren von 1,25 %. Auf Basis der Bewertungsmethodik erfolgte zunächst eine rechnerische Priorisierung der Maschinenklassen (siehe Abbildung 13b). Berücksichtigt wurden insbesondere:

- Maschinenanzahl
- Energie- und Kraftstoffverbrauch
- Leistung
- Nutzungsdauer
- Wartbarkeit
- Reichweite

- Zusatzkosten der Elektrifizierung
- Zuverlässigkeit

Anschließend wurden die Ergebnisse mit den Erkenntnissen der Experteninterviews abgeglichen. Dadurch konnten technische Reife, wirtschaftliche Umsetzbarkeit und Marktbedarf in die Bewertung einbezogen werden. Das Ergebnis ist eine konsolidierte Priorisierung, die sowohl das theoretische $CO_2$-Minderungspotenzial als auch die praktische Umsetzbarkeit berücksichtigt (siehe Abbildung 14). Die daraus abgeleitete Rangfolge unterscheidet Maschinenklassen mit hoher, mittlerer und niedriger Elektrifizierungspriorität und bildet die Grundlage für die weiteren Energie- und Infrastrukturberechnungen.

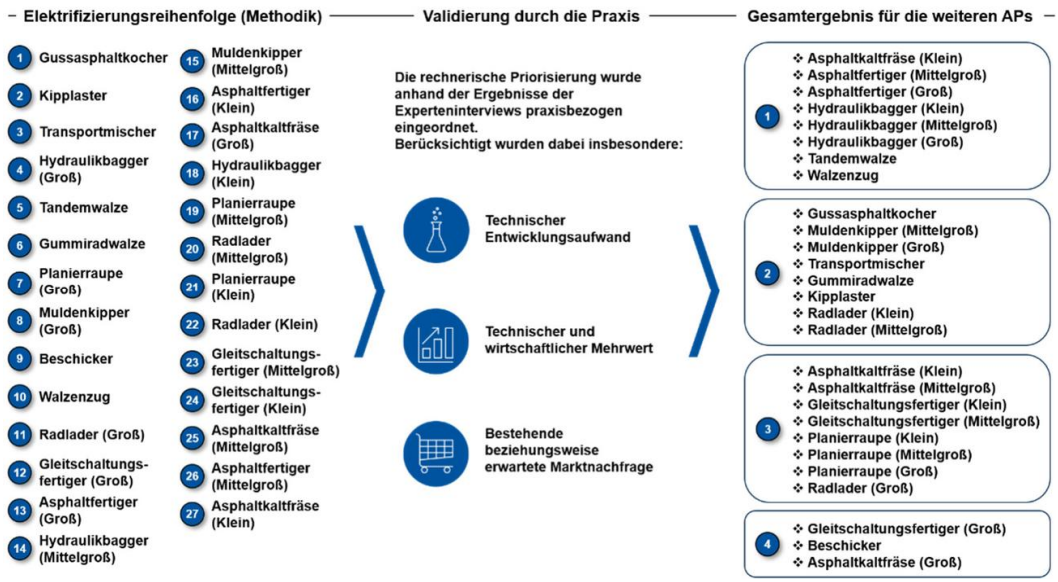



*Abbildung 14:Validierung der Ergebnisse aus der Methodik*

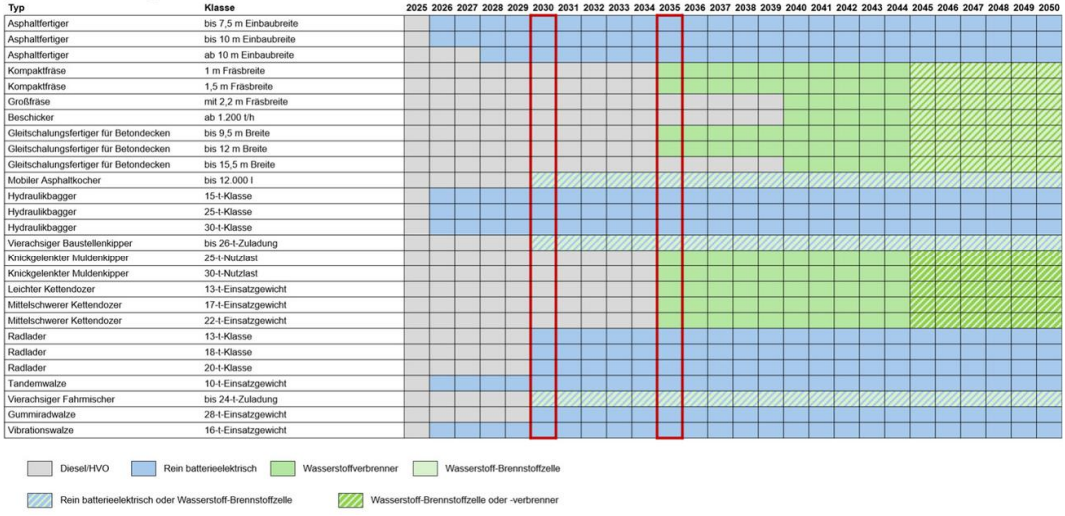
Das Ergebnis der Trendanalyse ist eine konsolidierte Priorisierung, die sowohl das theoretische $CO_2$-Minderungspotenzial als auch die praktische Umsetzbarkeit berücksichtigt. Die daraus abgeleitete Rangfolge unterscheidet Maschinenklassen mit hoher, mittlerer und niedriger Elektrifizierungspriorität und bildet die Grundlage für die weiteren Energie- und Infrastrukturberechnungen.

## Entwicklung der Antriebstechnologien bis 2050

Die Prognose zeigt, dass batterieelektrische Maschinen kurzfristig die wichtigste emissionsarme Antriebstechnologie im Straßenbau bleiben (Tabelle 5). Dies betrifft vor allem kleine und mittlere Maschinen mit planbaren Einsatzzeiten und verfügbaren Lademöglichkeiten. Diesel beziehungsweise HVO werden mittel- bis langfristig weiterhin als Referenz- und Übergangstechnologien relevant bleiben, insbesondere in Bereichen, in denen elektrische Alternativen noch nicht wirtschaftlich oder technisch verfügbar sind. Ab den 2030er Jahren wird eine zunehmende Marktdurchdringung wasserstoffbasierter Technologien erwartet. Dies betrifft vor allem Maschinen mit hohen Leistungsanforderungen, langen Betriebszeiten oder eingeschränkten Lademöglichkeiten. Ab etwa 2035 können Wasserstoff-Brennstoffzellen und teilweise auch Wasserstoff-Verbrennungsmotoren einen wesentlichen Beitrag zur Dekarbonisierung leistungsintensiver Anwendungen leisten.

Für einzelne Maschinenklassen ist derzeit noch kein eindeutiger technologischer Entwicklungspfad erkennbar. Die zukünftige Verbreitung batterieelektrischer und wasserstoffbasierter Lösungen wird maßgeblich von technologischen Fortschritten, Kostenentwicklungen, Infrastrukturverfügbarkeit und den Anforderungen des Baustellenbetriebs abhängen. Aus dieser Entwicklung ergeben sich unterschiedliche Anforderungen an Energieversorgung, Ladeinfrastruktur, Wasserstoffbereitstellung und Baustellenlogistik. Die Ergebnisse der Trendanalyse bilden daher die Grundlage für die nachfolgende Entwicklung und Bewertung geeigneter Infrastrukturkonzepte.

*Tabelle 5: Ergebnisse der Trendanalyse*



## 2.4 Ableitung von Infrastrukturkonzepten (AP 2.4)

Auf Grundlage der Prognose der Antriebstechnologien und der Kategorisierung der Fahrzeuge werden im nächsten Schritt Infrastrukturkonzepte für die Energieversorgung von Straßenbaustellen abgeleitet. Im Fokus steht, welche Versorgungslösungen in den jeweiligen Zeitabschnitten erforderlich sind, um Strom, Wasserstoff sowie Diesel bzw. HVO baustellengerecht bereitzustellen. Kurzfristig stehen vor allem Lösungen zur Stromversorgung batterieelektrischer Maschinen im Vordergrund; langfristig gewinnen ergänzend Konzepte zur Wasserstoffversorgung an Bedeutung.

Ziel ist es, für die unterschiedlichen Phasen der Elektrifizierung geeignete, wirtschaftliche und baustellenpraktikable Versorgungslösungen zu entwickeln. Eine zentrale Grundlage bildet die Differenzierung nach Baustellentypen. Anforderungen an Energieversorgung, Ladeinfrastruktur, Wasserstoffversorgung, Speicherlösungen und Logistik unterscheiden sich deutlich zwischen kleinen innerstädtischen Baustellen, mittleren Baustellen im Landstraßenbereich und großen Baustellen, insbesondere auf Autobahnen (Abbildung 15).

- **Kleine Baustellen** insbesondere im städtischen Bereich sind häufig gut an bestehende Strom- und Versorgungsinfrastruktur angebunden. Elektrische Maschinen lassen sich dadurch grundsätzlich leichter integrieren. Gleichzeitig bestehen meist gute logistische Anschlüsse für Kraftstoffe und Betriebsmittel. Besondere Anforderungen ergeben sich aus begrenzten Platzverhältnissen, geringen Rangierflächen sowie erhöhten Anforderungen an Lärm- und Emissionsminderung im Umfeld sensibler Nutzungen.

- **Mittlere Baustellen**, etwa im Landstraßenbereich, verfügen häufig über mehr Fläche und Rangierfreiheit. Auch lokale erneuerbare Energieerzeugung kann im Umfeld teilweise besser erschlossen werden. Gleichzeitig liegen solche Baustellen häufiger abseits leistungsfähiger Infrastruktur, sodass mobile Speicherlösungen, temporäre Netzanschlüsse oder alternative Versorgungskonzepte an Bedeutung gewinnen.

- **Große Baustellen**, insbesondere auf Autobahnen, bieten teilweise Anknüpfungspunkte wie Rastanlagen, PWC-Anlagen oder Betriebsstandorte für Energieversorgung, Zwischenlagerung und Ladebereiche. Zudem bestehen meist größere Flächenpotenziale für temporäre Versorgungseinheiten. Gleichzeitig sind hohe Energiebedarfe, lange Baustellenabschnitte, teilweise fehlende leistungsfähige Stromanschlüsse sowie die Abstimmung mit Verkehrsführung, Bauablauf und Logistik zu berücksichtigen.

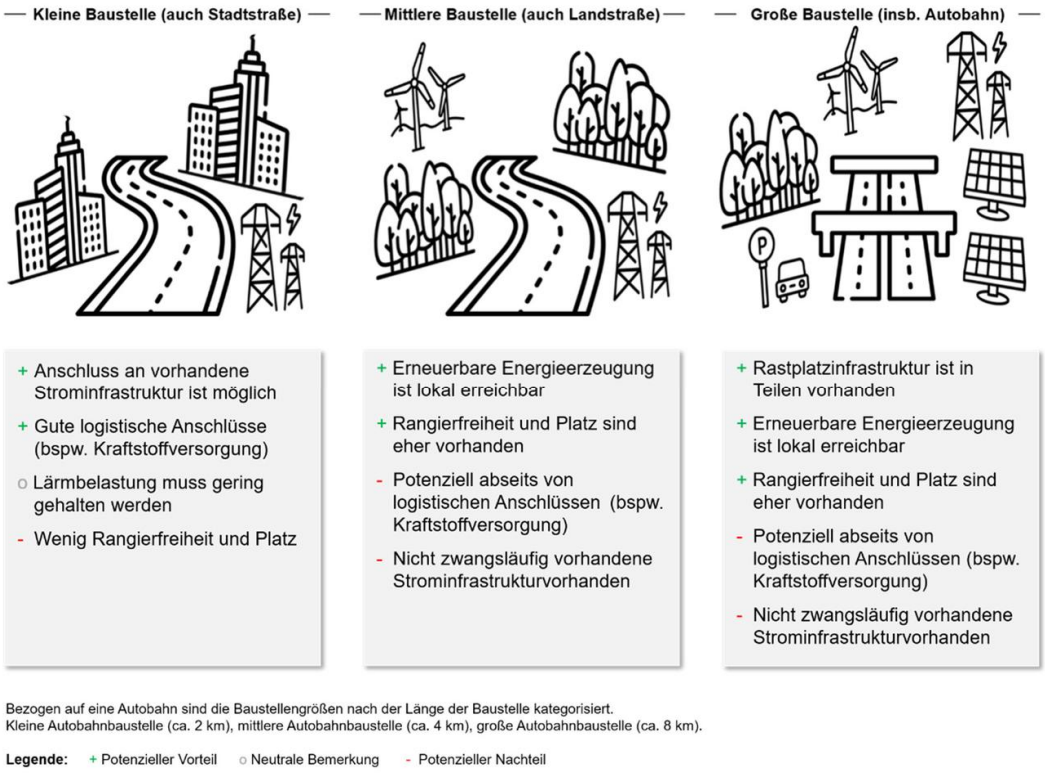



*Abbildung 15: Drei Arten von Baustellen müssen unterschieden werden*

Die Differenzierung nach Baustellentypen bildet damit die Grundlage für die weitere Konzeptentwicklung. Während bei kleinen städtischen Baustellen vor allem vorhandene Strominfrastruktur und emissionsarmer Betrieb relevant sind, gewinnen bei mittleren und großen Baustellen mobile, skalierbare und energieträgerübergreifende Versorgungslösungen an Bedeutung.

Aufgrund der hohen Energiebedarfe, der komplexen Verkehrsführung sowie der besonderen Anforderungen an Logistik und Flächenverfügbarkeit konzentriert sich die weitere Betrachtung auf große Straßenbaustellen im Autobahnbereich. Innerhalb dieser Kategorie wird zwischen Neubau- und Sanierungsmaßnahmen unterschieden. Während beim Neubau der vollständige Aufbau der Verkehrsfläche betrachtet wird, stehen bei Sanierungen Rückbau, Erneuerung und Instandsetzung bestehender Schichten im Vordergrund.

Zusätzlich wird zwischen Asphalt- und Betonbauweise differenziert. Je nach Bauweise unterscheiden sich Materialien, Bauphasen und eingesetzte Fahrzeuge. Bei Asphaltbauweisen sind insbesondere Fräsen, Transport, Einbau und Verdichtung relevant; bei Betonbauweisen kommen unter anderem Maschinen für Betontransport, Betoneinbau, Oberflächenbearbeitung und

Nachbehandlung zum Einsatz. Die nachfolgende Abbildung 16 zeigt die Bauphasen in Abhängigkeit von Maßnahmentyp und Bauweise. Auf dieser Grundlage können Maschinen und Fahrzeuge den jeweiligen Prozessen zugeordnet und die daraus resultierenden Anforderungen an Energieversorgung und Infrastruktur abgeleitet werden.

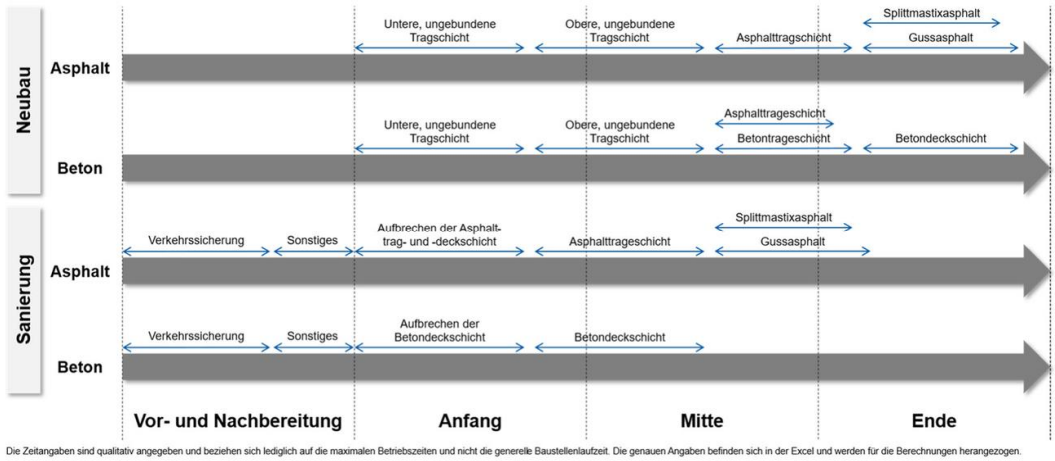



*Abbildung 16: Bauphasen in Abhängigkeit von Maßnahmentyp und Bauweise. Auf dieser Grundlage können Maschinen und Fahrzeuge den jeweiligen Prozessen zugeordnet und die daraus resultierenden Anforderungen an Energieversorgung und Infrastruktur abgeleitet werden.*

Für die differenzierten Straßenbaumaßnahmen wird zunächst ihre praktische Relevanz eingeordnet. Dazu werden für Deutschland, Österreich und die Schweiz Kennwerte betrachtet, die den Anteil der jeweiligen Straßenkategorie am gesamten Straßennetz, das Verhältnis von Sanierung zu Neubau sowie den Anteil von Asphalt- und Betonbauweisen abbilden. Im vorliegenden Beispiel liegt der Fokus auf Autobahnen. Die Kennwerte zeigen, dass Neubauvorhaben gegenüber Sanierungsmaßnahmen einen deutlich geringeren Anteil ausmachen. Der Schwerpunkt künftiger Straßenbaumaßnahmen liegt daher überwiegend im Bereich der Sanierung. Zugleich wird deutlich, dass Asphaltbauweisen in allen betrachteten Ländern deutlich häufiger vorkommen als Betonbauweisen. Asphaltmaßnahmen besitzen damit eine besonders hohe praktische Relevanz. Unabhängig davon werden für alle Maßnahmentypen die jeweiligen Energiebedarfe bestimmt. Grundlage sind die den Bauphasen zugeordneten Maschinen und Fahrzeuge sowie die für das jeweilige Referenzjahr angenommenen Antriebstechnologien. Abbildung 17 zeigt beispielhaft den Neubau einer Asphaltstraße in Splittmastixasphaltbauweise im Referenzjahr 2030. Der Energiebedarf wird nach Diesel, Wasserstoff und Strom gegliedert.



**Baustellenart:**

Neubau, Asphaltstraße, Splittmastixasphalt

**Referenzjahr:**

2030

**Häufigkeit der Straßenart im Straßennetz:** [1)]
Deutschland: 87,5 % Österreich: 66 % Schweiz: 77 %

**Anteil Sanierung / Neubau:** [1)]
Deutschland: 93 % / 7 % Österreich: 68 % / 32 % Schweiz: 83 % / 17 %

**Anteil Asphalt / Beton:** [1)]
Deutschland: 95 % / 5 % Österreich: 66 % / 34 % Schweiz: 90 % / 10 %

\+ Anschluss an vorhandene Strominfrastruktur ist möglich
\+ Gute logistische Anschlüsse (bspw. Kraftstoffversorgung)
o Lärmbelastung muss gering gehalten werden
\- Wenig Rangierfreiheit und Platz

*Menge an Energie, die zur Versorgung der Maschinen in ihren Betriebsstunden notwendig ist [kWh].*








| Kategorie | Maschine** | Anzahl* | Gesamtbetriebsstunden [h] | Technologie | Diesel/HVO | Wasserstoff | Strom |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Bagger | Hydraulikbagger | 2 | 664 | Batterieelektrisch | 0 | 0 | 6.719 |
| Ladung und Transport | Radlader | 2 | 664 | Batterieelektrisch | 0 | 0 | 7.784 |
| Planiermaschinen | Planierraupe | 2 | 664 | Diesel/HVO | 58.007 | 0 | 0 |
| Verdichtungsmaschinen | Walzenzüge | 1 | 167 | Batterieelektrisch | 0 | 0 | 3.560 |
| Asphaltfertiger | Asphaltfertiger | 1 | 27 | Diesel/HVO | 6.804 | 0 | 0 |
| Verdichtungsmaschinen | Gummiradwalze | 1 | 70 | Diesel/HVO | 7.314 | 0 | 0 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |

*Die Anzahl beläuft sich auf die maximale Maschinenanzahl in den jeweiligen Baustellenphasen. In der Berechnungsexcel kann hier unterschieden werden und der konkrete Bedarf je Phase ermittelt werden.

**Die hier präsentierten Maschinen stellen einen Auszug dar. Die vollständige Anzahl wird in der Berechnungsexcel erfasst.

*Abbildung 17: Beispiel: Abhängig von der Baustellenart und dem Referenzjahr werden Energiebedarfe bestimmt. 1)[89]*

Damit verbindet die Auswertung die praktische Relevanz der Maßnahme im D-A-CH-Kontext mit dem konkreten Energiebedarf einer definierten Bauweise und eines Referenzjahres. Diese Energiebedarfe bilden die Grundlage für die weitere Bewertung und Ableitung geeigneter Infrastrukturkonzepte. Die beispielhafte Herleitung wird anschließend auf weitere Straßenbaumaßnahmen übertragen. Die Energiebedarfe werden systematisch für Neubau- und Sanierungsmaßnahmen ermittelt, jeweils nach Asphalt- und Betonbauweise unterschieden und zusätzlich nach Baustellengröße differenziert.

Die nachfolgende Tabelle 6 fasst die berechneten Energiebedarfe für die Referenzjahre 2030, 2035, 2040, 2045 und 2050 zusammen. Dadurch wird sichtbar, wie sich der Energiebedarf je nach Maßnahmentyp, Bauweise, Baustellengröße und technologischem Entwicklungsstand verändert. Die Übersicht bildet eine zentrale Grundlage für die spätere Dimensionierung geeigneter Infrastrukturkonzepte. Alle Berechnungen, Randbedingungen und Annahmen sind in einer Excel-basierten Datengrundlage zusammengeführt. Ein manuell einstellbares Dashboard ermöglicht die Berechnung anwendungsspezifischer Szenarien. So können unterschiedliche Kombinationen aus Maßnahmentyp, Bauweise, Baustellengröße, Referenzjahr und Antriebstechnologie abgebildet und hinsichtlich ihres Energiebedarfs ausgewertet werden.

*Tabelle 6: Ableitung der Entwicklung der Energiebedarfe*

| Die Energiebedarfe sind in kWh angegeben. | | | 2030 | | | 2035 | | | 2040 | | | 2045 | | | 2050 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Diesel/ HVO | Strom | Wasser-stoff | Diesel/ HVO | Strom | Wasser-stoff | Diesel/ HVO | Strom | Wasser-stoff | Diesel/ HVO | Strom | Wasser-stoff | Diesel/ HVO | Strom | Wasser-stoff |
| Neubau | Asphalt | Groß | 717.013 | 2.910.632 | - | 114.685 | 2.769.366 | 1.308.533 | - | 2.634.957 | 1.470.945 | - | 2.507.071 | 1.382.360 | - | 2.385.392 | 1.299.111 |
| | | Mittel | 54.293 | 387.160 | - | 4.995 | 368.369 | 107.340 | - | 350.491 | 111.381 | - | 333.480 | 104.673 | - | 317.295 | 98.369 |
| | | Klein | 3.605 | 41.983 | - | 642 | 39.946 | 6.433 | - | 38.007 | 7.396 | - | 36.162 | 6.951 | - | 34.407 | 6.532 |
| | Beton | Groß | 738.000 | 2.881.578 | 754.824 | 135.155 | 2.741.723 | 2.009.206 | - | 2.608.655 | 2.164.407 | - | 2.482.046 | 2.026.569 | - | 2.361.581 | 1.897.570 |
| | | Mittel | 57.741 | 399.495 | 109.263 | - | 380.106 | 227.470 | - | 361.658 | 212.603 | - | 344.105 | 198.715 | - | 327.404 | 185.741 |
| | | Klein | 12.886 | 47.200 | 16.436 | - | 44.909 | 43.386 | - | 42.729 | 40.597 | - | 40.655 | 37.989 | - | 38.682 | 35.550 |
| Sanierung | Asphalt | Groß | 234.142 | 981.869 | - | 197.572 | 934.215 | 68.940 | - | 888.873 | 480.340 | - | 845.732 | 451.413 | - | 804.685 | 424.227 |
| | | Mittel | 10.666 | 139.039 | - | 4.995 | 132.291 | 12.105 | - | 125.870 | 21.881 | - | 119.761 | 20.563 | - | 113.948 | 19.325 |
| | | Klein | 2.376 | 31.486 | - | 642 | 29.958 | 3.750 | - | 28.504 | 4.875 | - | 27.120 | 4.581 | - | 25.804 | 4.305 |
| | Beton | Groß | 124.540 | 860.016 | 377.412 | 67.577 | 818.276 | 470.959 | - | 778.561 | 580.697 | - | 740.775 | 541.980 | - | 704.822 | 505.864 |
| | | Mittel | 16.969 | 143.501 | 54.632 | 9.806 | 136.537 | 65.809 | - | 129.910 | 81.887 | - | 123.605 | 76.413 | - | 117.606 | 71.308 |
| | | Klein | 2.414 | 35.055 | 8.218 | - | 33.354 | 12.897 | - | 31.735 | 12.033 | - | 30.195 | 11.227 | - | 28.729 | 10.475 |

Nachdem die Energiebedarfe nach Maßnahmentyp, Bauweise, Baustellengröße und Referenzjahr bestimmt wurden, wird die erforderliche Energieinfrastruktur betrachtet. Ziel ist es, die Bedarfe an Diesel bzw. HVO, Wasserstoff und Strom mit geeigneten Bereitstellungs- und Versorgungspfaden zu verknüpfen. Abbildung 18 zeigt den generellen Aufbau der Energieversorgung von der Erzeugung bzw. Bereitstellung der Energieträger bis zur Nutzung im Baustellenumfeld. Dabei wird zwischen vorgelagerten Energiequellen, der Anlieferung bzw. Übertragung zur Baustelle sowie der Umwandlung, Speicherung und Verteilung vor Ort unterschieden.

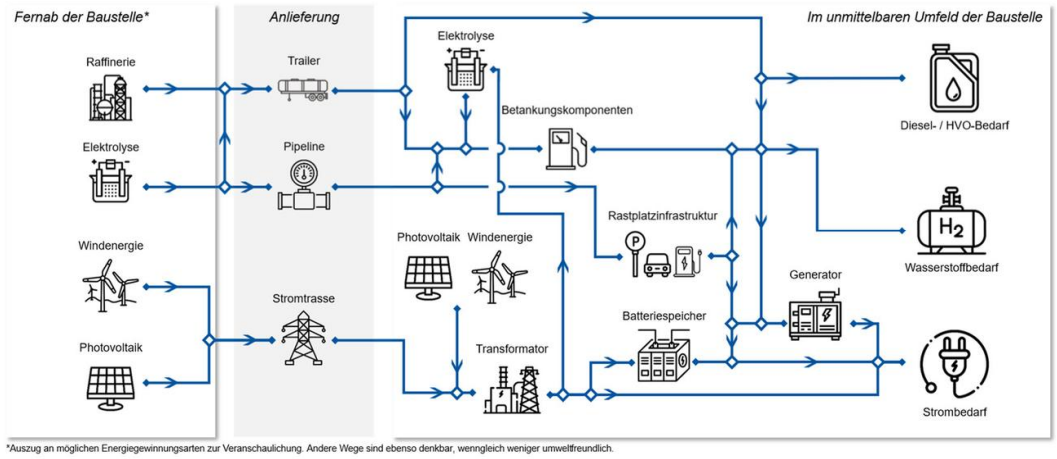



*Abbildung 18: In der Theorie existiert eine Vielzahl an Infrastrukturkonzepten, die beliebig kombinierbar sind.*

**Fernab der Baustelle** werden Energiequellen und Energieträger bereitgestellt. Dazu zählen Raffinerieprodukte für Diesel bzw. HVO, Wasserstoff aus der Elektrolyse sowie Strom aus Windenergie und Photovoltaik. Die Anlieferung bzw. Übertragung zur Baustelle erfolgt je nach Energieträger über Trailer, Pipelines oder Stromtrassen.

Im **unmittelbaren Baustellenumfeld** werden die Energieträger für den Einsatz aufbereitet, gespeichert und verteilt. Relevante Bausteine sind unter anderem Elektrolyseure, Betankungskomponenten, Batteriespeicher, Transformatoren, Generatoren, Rastplatz- bzw. Ladeinfrastruktur sowie lokale erneuerbare Energieerzeugung. Daraus ergeben sich die Versorgungspfade für Diesel-/HVO-, Wasserstoff- und Strombedarf. Die Darstellung verdeutlicht, dass die Energieversorgung elektrifizierter und perspektivisch fossilfreier Straßenbaustellen nicht durch eine einzelne Infrastrukturkomponente abgebildet werden kann. Erforderlich ist vielmehr ein Gesamtsystem, das Erzeugung, Transport, Speicherung, Umwandlung und Nutzung verschiedener Energieträger miteinander verknüpft. Auf dieser Grundlage wird im folgenden Abschnitt das Gesamtkonzept für die Energieversorgung von Straßenbaustellen entwickelt.

## 2.5 Entwicklung eines Gesamtkonzepts (AP 2.5)

Aufbauend auf den zuvor ermittelten Energiebedarfen und den identifizierten Versorgungspfaden werden im nächsten Schritt mögliche Energie- und Infrastrukturkonzepte für Straßenbaustellen systematisch bewertet. Ziel ist es, die technischen Lösungsansätze nicht isoliert zu betrachten, sondern ihre Eignung für unterschiedliche Baustellentypen, Einsatzbedingungen und Anforderungen vergleichbar einzuordnen.

*Hierzu werden die relevanten Versorgungskonzepte in einer gemeinsamen Übersicht zusammengeführt (*
Abbildung 19). Betrachtet werden insbesondere folgende Infrastrukturbausteine:

- On-site-Elektrolyse,
- Rastplatzinfrastruktur,
- mobile Betankungskomponenten für Wasserstoff,
- lokale Photovoltaik- und Windenergie,
- lokale Transformatoren mit mobiler Ladeinfrastruktur,
- Batteriespeicher mit mobiler Ladeinfrastruktur
- sowie Generatoren in Kombination mit mobiler Ladeinfrastruktur.




*Abbildung 19: Katalog auf Basis der Konzepte und Kriterien*

Die Bewertung erfolgt anhand mehrerer Kriterien. Berücksichtigt werden einerseits Anforderungen aus den Experteninterviews, insbesondere Kosten, Zeitaufwand, Mobilität, Zuverlässigkeit und Handhabbarkeit. Andererseits wird die grundsätzliche Machbarkeit für kleine, mittlere und große Baustellen bewertet,

da sich Flächenverfügbarkeit, Energiebedarf, Netzanschlussmöglichkeiten und logistische Anforderungen je nach Baustellentyp deutlich unterscheiden.
Auf dieser Grundlage werden die Konzepte in die Prioritätskategorien A, B und C eingeordnet:

- Kategorie A umfasst Infrastrukturansätze mit hoher Relevanz und guter kurzfristiger Umsetzbarkeit.
- Kategorie B beschreibt ergänzende Lösungen, deren Einsatz stark von den konkreten Baustellenrandbedingungen abhängt.
- Kategorie C umfasst Optionen mit geringerer kurzfristiger Priorität, die perspektivisch oder in Sonderfällen dennoch relevant sein können.

Die Bewertung zeigt, dass kein einzelnes Versorgungskonzept alle Anforderungen gleichermaßen erfüllt. Die Energieversorgung elektrifizierter Straßenbaustellen ergibt sich vielmehr aus der Kombination mehrerer Infrastrukturbausteine. Je nach Baustellentyp und zeitlichem Entwicklungspfad sind insbesondere mobile Batteriespeicher, mobile Ladeinfrastruktur, lokale Netzanschlüsse, erneuerbare Energiequellen sowie perspektivisch Wasserstoffkomponenten sinnvoll miteinander zu verbinden.

### 2.5.1 Voraussetzungen für eine Wasserstoffinfrastruktur

Auf Grundlage des zuvor ermittelten Wasserstoffbedarfs wird geprüft, mit welcher Infrastruktur dieser Bedarf auf der Baustelle technisch sinnvoll gedeckt werden kann. Ausgangspunkt ist der berechnete Wasserstoffbedarf der betrachteten Baustelle. Darauf aufbauend werden die vorhandenen Randbedingungen analysiert und schrittweise geeignete Versorgungsoptionen geprüft.

**Prüfreihenfolge für Wasserstofflösungen**

Zunächst wird untersucht, ob der Einsatz mobiler Wasserstoff-Betankungskomponenten technisch machbar ist. Diese Option wurde in der vorangegangenen Bewertung der Kategorie A zugeordnet. Ist sie grundsätzlich realisierbar, wird im nächsten Schritt geprüft, ob auch die relevanten technischen Limitationen eingehalten werden. Sind beide Voraussetzungen erfüllt, kann die Lösung als geeignete Infrastrukturmaßnahme für die Baustelle festgelegt werden.

Kann der Wasserstoffbedarf nicht über mobile Betankungskomponenten gedeckt werden, wird anschließend die Einbindung vorhandener Rastplatzinfrastruktur betrachtet. Diese Lösung entspricht Kategorie B und kommt insbesondere dann infrage, wenn im Umfeld der Baustelle bereits nutzbare Wasserstoffinfrastruktur vorhanden ist. Auch hier werden zunächst die technische Machbarkeit und anschließend die relevanten Limitationen geprüft. Sofern weder mobile Betankungskomponenten noch Rastplatzinfrastruktur umsetzbar sind, wird als nachgelagerte Option der Kategorie C die On-site-Elektrolyse geprüft.

Dabei wird untersucht, ob Wasserstoff direkt auf der Baustelle oder in unmittelbarer Nähe erzeugt werden kann. Auch diese Lösung wird nur dann in das Gesamtkonzept übernommen, wenn sowohl die technische Machbarkeit als auch die spezifischen Limitationen erfüllt sind. Ist auch die On-site-Elektrolyse nicht sinnvoll oder technisch nicht umsetzbar, kann Wasserstoff für die betrachtete Baustelle nicht zweckmäßig eingesetzt werden. In diesem Fall muss die Fahrzeugauswahl neu geplant werden. Wasserstoffbetriebene Maschinen und Fahrzeuge sind dann aus der Betrachtung herauszunehmen; für die weitere Planung ist stattdessen der Ablauf zur Versorgung batterieelektrischer Antriebe bzw. des Strombedarfs heranzuziehen.

**Bewertungskriterien und technische Limitationen für Wasserstoff**

Für die Bewertung der technischen Machbarkeit werden je nach Versorgungsoption unterschiedliche Kriterien herangezogen. Bei mobilen Betankungskomponenten ist insbesondere zu prüfen, ob Druckwasserstoff mit 350 bar bzw. 700 bar verfügbar ist. Bei Rastplatzinfrastruktur ist relevant, ob der Standort trotz Baustelle weiterhin beliefert wird, ob er von der Baustelle aus erreichbar ist, ob die Anlage für das Rangieren der eingesetzten Baumaschinen geeignet ist und ob die Fahrtzeiten zwischen Baustelle und Betankungspunkt praxistauglich bleiben.

Wesentliche technische Limitationen wasserstoffbasierter Betankungslösungen sind die häufig begrenzte maximale Abgabemenge von etwa 200 kg Wasserstoff pro Tag je Tankstelle, die unterschiedliche Nutzbarkeit von 350-bar- und 700-bar-Systemen sowie mögliche Wartezeiten bei mehreren aufeinanderfolgenden Betankungen. Diese entstehen, weil Pufferspeicher zwischen den Tankvorgängen wieder auf den erforderlichen Vordruck gebracht werden müssen. Bei größeren Maschinen können die Verzögerungen entsprechend stärker ausfallen. Für die On-site-Elektrolyse sind zusätzliche Machbarkeitskriterien zu berücksichtigen. Dazu zählen ein verfügbarer Wasseranschluss, ein leistungsfähiger Stromanschluss, ausreichende Netzstabilität trotz hoher Lasten, geeignete Stellflächen auf der Baustelle sowie die Einhaltung der erforderlichen Sicherheitsabstände, insbesondere der ATEX-Zonen, also explosionsgefährdeter Bereiche. Zusätzlich ist zu prüfen, ob Gründe, die gegen mobile Betankungskomponenten sprechen, nicht gleichermaßen den Einsatz einer On-site-Elektrolyse ausschließen.

Auch die On-site-Elektrolyse unterliegt konkreten technischen Limitationen. Je Betankungseinheit in Form eines 20-Fuß-Containers zuzüglich eines 300-bar-Versorgungsbündels sind etwa 25 m² Stellfläche erforderlich. Die Gesamtfläche je 1-MW-Elektrolyse-Container beträgt ebenfalls rund 25 m². Zudem wird je 500 kg Wasserstoff pro Tag eine Stromversorgungsleistung von etwa 1 MW benötigt. Der Wasserbedarf liegt bei ungefähr 8 Litern je kg erzeugtem Wasserstoff.

An jeder Wasserstoff-Ablassvorrichtung ist außerdem eine ATEX-Zone mit einem Radius von 5 m einzuhalten. Die Vorgehensweise verdeutlicht, dass die Planung der Wasserstoffinfrastruktur nicht allein vom rechnerischen Bedarf abhängt. Entscheidend sind technische, sicherheitsrelevante und logistische Randbedingungen. Das Flussdiagramm schafft damit eine systematische Entscheidungsgrundlage, um für jede Baustelle eine geeignete Wasserstoffversorgung zu identifizieren oder frühzeitig auf alternative Antriebstechnologien auszuweichen.

### 2.5.2 Voraussetzungen für eine Strominfrastruktur

Parallel zur Wasserstoffinfrastruktur wird die Deckung des Strombedarfs betrachtet. Ausgangspunkt ist der zuvor berechnete Energiebedarf der Baustelle. Darauf aufbauend wird schrittweise geprüft, welche Strominfrastruktur unter den vorhandenen Randbedingungen technisch machbar ist und welche Limitationen zu berücksichtigen sind.

**Prüfreihenfolge für Stromversorgungslösungen**

Zunächst werden die priorisierten Konzepte der Kategorie A betrachtet. Dazu zählen lokale erneuerbare Energiequellen sowie der Anschluss an lokale Transformatoren in Verbindung mit mobiler Ladeinfrastruktur. Bei erneuerbaren Energiequellen wird geprüft, ob der Strombedarf der Baustelle vollständig oder anteilig durch vorhandene oder temporär errichtete Anlagen gedeckt werden kann. Beim Transformatoranschluss wird bewertet, ob eine ausreichende Anschlussleistung verfügbar ist und die mobile Ladeinfrastruktur sinnvoll eingebunden werden kann. Können lokale erneuerbare Energiequellen und Transformatoren nicht sinnvoll genutzt werden, folgt als Option der Kategorie B die Einbindung bestehender Rastplatzinfrastruktur.

Dabei ist zu prüfen, ob Schnellladeinfrastruktur oder geeignete nächtliche Stellplätze vorhanden sind, ob der Rastplatz trotz Baustelle in Betrieb bleibt und ob er mit vertretbaren Fahrtzeiten erreichbar ist. Zu berücksichtigen ist zudem, dass Rastplatzinfrastruktur meist nicht für Baumaschinen ausgelegt ist. Dadurch kann sich die tatsächlich nutzbare Anzahl an Ladepunkten reduzieren. Ist auch Rastplatzinfrastruktur nicht ausreichend oder nicht verfügbar, wird der Einsatz von Batteriespeichern mit mobiler Ladeinfrastruktur geprüft.

Batteriespeicher können Energie zwischenspeichern, Lastspitzen puffern und kurzfristig Ladeleistung bereitstellen. Entscheidend sind ausreichende Stellflächen, erreichbare Nachlademöglichkeiten sowie die Zugänglichkeit für einen regelmäßigen Austausch der Speichercontainer. Technisch ist zu berücksichtigen, dass ein 10-Fuß-Container mit etwa 126 kWh Speicherkapazität rund 10 m² Stellfläche benötigt und in der Regel nur eine Maschine gleichzeitig laden kann.

Reicht auch diese Lösung nicht aus, wird abschließend der Einsatz von Generatoren mit mobiler Ladeinfrastruktur betrachtet. Generatoren ermöglichen eine weitgehend unabhängige Strombereitstellung und sind insbesondere dort relevant, wo Netzanschlüsse, erneuerbare Energiequellen, Rastplatzinfrastruktur oder Batteriespeicher nicht ausreichend verfügbar sind. Für die Machbarkeit sind Stellflächen für Generatoren, Ladeinfrastruktur und Maschinen sowie eine zuverlässige Kraftstoffversorgung zu prüfen. Als Richtwert kann für einen 400-kW-Generator mit etwa 80 l/h Verbrauch und 10 h Laufzeit ein Platzbedarf von rund 25 m² angesetzt werden; für einen 300-kW-Schnelllader mit Pufferbatterie kommen etwa 10 m² hinzu.

**Bewertungskriterien und technische Limitationen für Strom**

Für jede Stromversorgungslösung sind spezifische Machbarkeiten und Limitationen zu bewerten. Bei lokalen erneuerbaren Energiequellen ist zu prüfen, ob der Betreiber die Nutzung erlaubt, ob die Anschlussleistung ausreicht, ob der Anlagenbetrieb trotz Baustelle möglich bleibt und ob die Leistung ohne Netzengpässe abgerufen werden kann. Zusätzlich ist zu bewerten, ob mobile Erzeugungsanlagen, beispielsweise PV-integrierte Lärmschutzwände, auf der Baustelle aufgestellt werden können. Bei der Planung ist zu berücksichtigen, dass erneuerbare Energiequellen nicht dauerhaft mit voller Leistung zur Verfügung stehen.

Als Orientierungswerte gelten in Deutschland etwa 987 Volllaststunden pro Jahr für Solarenergie und rund 2.518 Volllaststunden pro Jahr für Windenergie. Beim Anschluss an lokale Transformatoren ist zu prüfen, ob Transformatoren mit ausreichender Leistung in der Umgebung vorhanden oder temporär platzierbar sind, ob das Spannungsniveau geeignet ist, ob der Netzbetreiber die Nutzung zulässt und ob genügend Stellflächen für Ladeinfrastruktur und Maschinen vorhanden sind. Netzanschlüsse größer 11 kW sind gegenüber dem Netzbetreiber genehmigungspflichtig. Dadurch können zusätzliche Abstimmungen, Vorlaufzeiten und technische Anforderungen entstehen.

**Schlussfolgerung für die allgemeine Konzeptbewertung**

Die beschriebene Vorgehensweise zeigt, dass die parallele Planung der Strom- und Wasserstoffinfrastruktur stufenweise erfolgt und sich an der Priorisierung der zuvor bewerteten Konzepte orientiert. Zunächst werden Lösungen mit hoher Priorität geprüft, bevor ergänzende oder nachgelagerte Optionen herangezogen werden. Erst wenn keine der betrachteten Strom- bzw. Wasserstoffversorgungslösungen technisch sinnvoll umgesetzt werden kann, muss die Fahrzeugauswahl neu geplant werden. In diesem Fall sind jeweils Wasserstoff bzw. Strom als Energieträger unter den gegebenen Randbedingungen nicht zweckmäßig einsetzbar. Die jeweiligen Antriebe sind dann auszuschließen bzw.

gegeneinander zu ersetzen und stattdessen sind HVO und Diesel als alternative Energieträger bzw. Antriebstechnologien zu prüfen. Die beschriebenen Abläufe zur Deckung des Wasserstoff- und Strombedarfs bilden die Grundlage für die nachfolgende Konzeptbewertung.

## 2.6 Konzeptbewertung (AP 2.6)

Im Rahmen der Konzeptbewertung werden die zuvor entwickelten Infrastruktur- und Elektrifizierungskonzepte auf konkrete Anwendungsszenarien übertragen und hinsichtlich ihrer praktischen Umsetzbarkeit bewertet. Grundlage hierfür bilden die in den vorherigen Kapiteln erarbeiteten Erkenntnisse zum Stand der Technik, zur Verfügbarkeit elektrifizierter Gerätetechnik sowie zu den Anforderungen an Energieversorgung, Ladeinfrastruktur und Baustellenlogistik.

Ausgehend von den identifizierten Infrastrukturkonzepten erfolgt zunächst eine systematische Bewertung anhand definierter Kriterien. Diese berücksichtigen sowohl technische als auch betriebliche und baustellenspezifische Anforderungen. Dazu zählen unter anderem die Verfügbarkeit und Einsatzfähigkeit geeigneter Maschinen, der Energiebedarf der Bauprozesse, die Leistungsfähigkeit der erforderlichen Lade- und Versorgungsinfrastruktur sowie die Einbindung in den laufenden Baustellenbetrieb. Ziel ist es, die Konzepte nicht isoliert zu betrachten, sondern ihre Anwendbarkeit unter realistischen Randbedingungen des Straßenbaus zu prüfen. Die Bewertung erfolgt anhand repräsentativer Bauverfahren, die typische Anwendungsfälle von Großbaustellen im Straßenbau abbilden. Hierzu zählen:

- die grundhafte Sanierung einer Asphaltstraße mit Walzasphalt,
- die grundhafte Sanierung einer Asphaltstraße mit Gussasphalt,
- die grundhafte Sanierung einer Betonstraße sowie
- die Deckensanierung einer Asphaltstraße mit Walzasphalt und
- die Deckensanierung einer Asphaltstraße mit Gussasphalt.

Durch diese Auswahl werden unterschiedliche Bauweisen, Maschinenketten, Materialströme und Energiebedarfe berücksichtigt. Zur einheitlichen Bewertung der Szenarien wurde zunächst der bautechnische Betrachtungsumfang je Sanierungsart abgegrenzt. Die nachfolgenden Schaubilder zeigen (Abbildung 20: Betrachtungsumfang Grundhafte Sanierung einer Asphaltstraße / Abbildung 21: Betrachtungsumfang Grundhafte Sanierung einer Betonstraße/ Abbildung 22: Betrachtungsumfang Deckensanierung einer Asphaltstraße), welche Schichten des Straßenaufbaus im jeweiligen Szenario berücksichtigt werden und welche Bereiche außerhalb des Untersuchungsrahmens liegen. Diese Abgrenzung bildet die Grundlage für die anschließende Ableitung der Bauprozesse, Maschinenketten und Energiebedarfe.

Für die Bewertung der Asphaltvarianten wird zunächst der Betrachtungsumfang der grundhaften Sanierung einer Asphaltstraße abgegrenzt. Berücksichtigt werden die Schichten des Oberbaus, bestehend aus Asphaltdeckschicht, Asphaltbinderschicht, Asphalttragschicht, Schottertragschicht und Frostschutzschicht.

Unterbau und Untergrund sind nicht Bestandteil der Untersuchung. Die Darstellung bildet die Grundlage für die anschließende Bewertung der Varianten mit Walzasphalt und Gussasphalt.

Für die grundhafte Sanierung einer Betonstraße umfasst der Betrachtungsumfang die Betondecke, die Asphaltzwischenschicht bzw. ein alternatives Vlies, die Tragschicht mit hydraulischem Bindemittel sowie die Frostschutzschicht. Unterbau und Untergrund werden auch in diesem Szenario nicht berücksichtigt. Die Abgrenzung dient dazu, die relevanten Bauprozesse und Maschinenketten eindeutig auf die betrachteten Schichten des Oberbaus zu beziehen.

Die Deckensanierung einer Asphaltstraße unterscheidet sich von der grundhaften Sanierung durch den deutlich begrenzteren Eingriff in den Straßenaufbau. Im betrachteten Szenario werden ausschließlich Asphaltdeckschicht und Asphaltbinderschicht erneuert. Die darunterliegenden Schichten, insbesondere Asphalttragschicht, Schottertragschicht, Frostschutzschicht sowie Unterbau und Untergrund, bleiben unberücksichtigt.

Die Unterscheidung zwischen Walzasphalt und Gussasphalt erfolgt nicht über den grundsätzlichen Schichtenaufbau, sondern über das jeweilige Bauverfahren, die eingesetzte Maschinentechnik, die Materiallogistik und den daraus resultierenden Energiebedarf. Die bautechnische Abgrenzung des Betrachtungsumfangs gilt daher jeweils gemeinsam für die Asphaltvarianten, während die Bewertung der Bauverfahren in den nachfolgenden Beispielszenarien separat erfolgt. Für jedes Anwendungsszenario werden die relevanten Bauphasen und Maschinengruppen betrachtet und den zuvor entwickelten Infrastrukturkonzepten gegenübergestellt.

Die Bewertung erfolgt für die Zeithorizonte 2027, 2040 und 2050, um sowohl kurzfristig realisierbare Umsetzungsmöglichkeiten als auch langfristige Entwicklungspfade abzubilden. Dadurch kann aufgezeigt werden, welche Konzepte bereits unter heutigen bzw. absehbaren Marktbedingungen anwendbar sind und welche Voraussetzungen für eine weitergehende Elektrifizierung von Großbaustellen geschaffen werden müssen.

Die Konzeptbewertung bildet damit die Schnittstelle zwischen der theoretischen Ableitung möglicher Elektrifizierungslösungen und deren praktischer Anwendung auf konkrete Bauabläufe. Sie dient als Grundlage für die nachfolgende Bewertung der einzelnen Beispielszenarien sowie für die Ableitung übergreifender Erkenntnisse zur Elektrifizierung von Großbaustellen im Straßenbau.

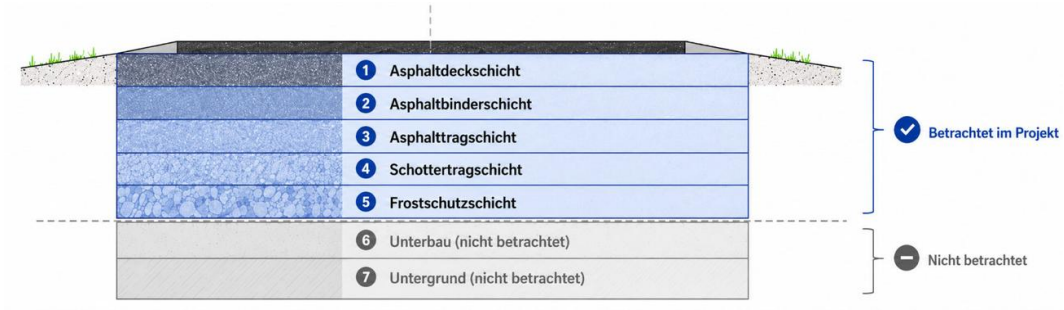



*Abbildung 20: Betrachtungsumfang Grundhafte Sanierung einer Asphaltstraße*

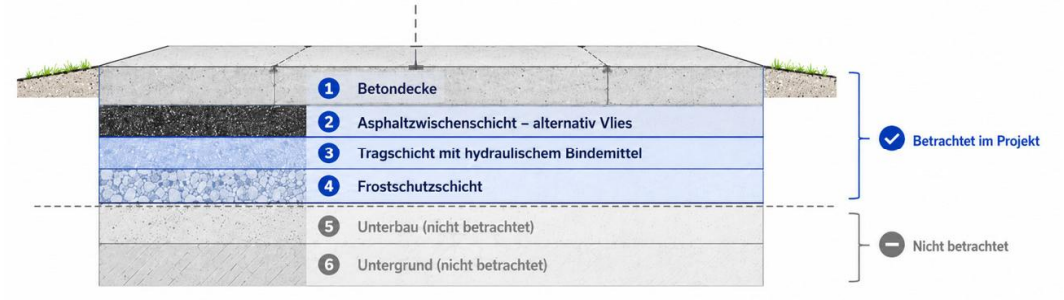



*Abbildung 21: Betrachtungsumfang Grundhafte Sanierung einer Betonstraße*

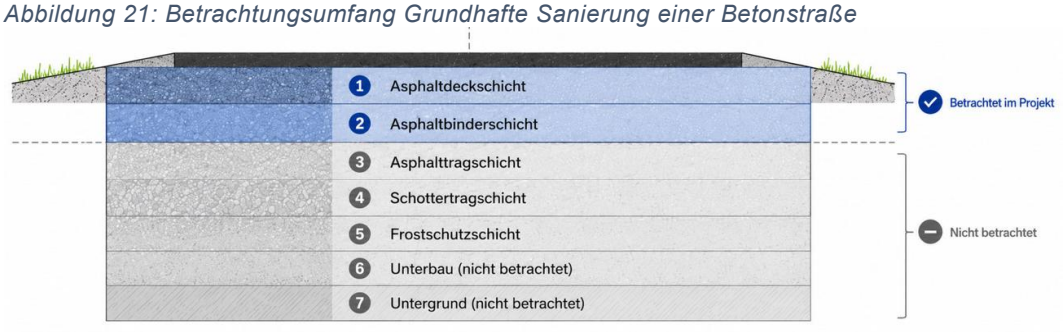



*Abbildung 22: Betrachtungsumfang Deckensanierung einer Asphaltstraße*

Auf Grundlage der zuvor entwickelten Infrastruktur- und Energiekonzepte sowie der daraus abgeleiteten Konzeptabfolge wurden die definierten Sanierungsszenarien für unterschiedliche Zeithorizonte bewertet. Hierdurch ergeben sich insgesamt 15 Bewertungsfälle, die eine zeitliche Einordnung der technischen Entwicklung und der zunehmenden Elektrifizierbarkeit der Bauprozesse ermöglichen. Für die betrachteten Praxisbeispiele wurde ein einheitlicher verkehrlicher und baulicher Rahmen zugrunde gelegt (Abbildung 23).

Die Szenarien beziehen sich auf Autobahnabschnitte mit drei Fahrstreifen je Fahrtrichtung und einer angenommenen Sanierungslänge von ca.7 km. Für die Bauausführung wird ein 4+0-Verkehrsführungskonzept angesetzt, bei dem der Verkehr über Mittelstreifenüberfahrten vollständig auf die Gegenfahrbahn

übergeleitet wird. Dadurch steht die zu sanierende Richtungsfahrbahn dem Bauprozess weitgehend unabhängig vom fließenden Verkehr zur Verfügung. Auf diese Weise können die eingesetzten Maschinen, Prozessketten und Energiebedarfe unter einheitlichen Randbedingungen betrachtet und die unterschiedlichen Sanierungsszenarien sowie Zeithorizonte miteinander verglichen werden.

| | 2027 | 2040 | 2050 |
|---|---|---|---|
| **Grundhafte Sanierung einer Asphaltstraße mit Walzasphalt** | *Beispiel A* | *Beispiel B* | *Beispiel C* |
| **Grundhafte Sanierung einer Asphaltstraße mit Gussasphalt** | *Beispiel D* | *Beispiel E* | *Beispiel F* |
| **Grundhafte Sanierung einer Betonstraße** | *Beispiel G* | *Beispiel H* | *Beispiel I* |
| **Deckensanierung einer Asphaltstraße mit Walzasphalt** | *Beispiel J* | *Beispiel K* | *Beispiel L* |
| **Deckensanierung einer Asphaltstraße mit Gussasphalt** | *Beispiel M* | *Beispiel N* | *Beispiel O* |

*Abbildung 23: Übersicht der Bewertungsfälle nach Sanierungsszenario und Zeithorizont.*

Aufbauend auf den definierten Bewertungsfällen wurde der Energiebedarf für jedes Sanierungsszenario und jedes Betrachtungsjahr getrennt nach Energieträgern ermittelt. Die nachfolgende Übersicht stellt die Ergebnisse für die Jahre 2027, 2040 und 2050 zusammenfassend gegenüber (siehe Tabelle 7).

*Tabelle 7: Energiebedarfe nach Sanierungsszenario, Betrachtungsjahr und Energieträger*

| Szenario | 2027 | | | 2040 | | | 2050 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Diesel/ HVO | Strom | Wasser-stoff | Diesel/ HVO | Strom | Wasser-stoff | Diesel/ HVO | Strom | Wasser-stoff |
| Grundhafte Sanierung einer Asphaltstraße mit Walzasphalt | 45.924 | 247.813 | 0 | 0 | 230.070 | 69.032 | 0 | 208.279 | 60.917 |
| Grundhafte Sanierung einer Asphaltstraße mit Gussasphalt | 47.653 | 229.002 | 0 | 0 | 216.024 | 68.288 | 0 | 195.563 | 60.253 |
| Grundhafte Sanierung einer Betonstraße | 38.080 | 318.181 | 0 | 0 | 191.910 | 202.375 | 0 | 173.734 | 175.573 |
| Deckensanierung einer Asphaltstraße mit Walzasphalt | 16.851 | 94.054 | 0 | 0 | 85.891 | 26.943 | 0 | 77.756 | 23.775 |
| Deckensanierung einer Asphaltstraße mit Gussasphalt | 20.737 | 83.287 | 0 | 0 | 78.975 | 30.437 | 0 | 71.495 | 26.855 |

Die Energiebedarfe sind in kWh angegeben.

### 2.6.1 Beispiel: Grundhafte Sanierung / Asphaltstraße / Walzasphalt

Im folgenden Beispiel wird die grundhafte Sanierung einer Asphaltstraße mit Walzasphalt betrachtet. Der bautechnische Betrachtungsumfang umfasst die Asphaltdeckschicht, Asphaltbinderschicht, Asphalttragschicht, Schottertragschicht und Frostschutzschicht. Die Bewertung erfolgt auf Grundlage der zuvor definierten Randbedingungen für einen Autobahnabschnitt mit drei Fahrstreifen je Fahrtrichtung, einer angenommenen Sanierungslänge von ca. 7 km sowie einer 4+0-Verkehrsführung während der Bauausführung. Auf dieser Grundlage werden die erforderlichen Bauprozesse, die eingesetzten Maschinenketten und der daraus resultierende Energiebedarf für die Betrachtungsjahre 2027, 2040 und 2050 bewertet. Im Mittelpunkt steht die Frage, welche Infrastruktur- und Energiekonzepte zur Versorgung elektrifizierter Maschinen grundsätzlich geeignet sind und welcher Platzbedarf sich daraus innerhalb bzw. im Umfeld der Baustelle ergibt. Neben der reinen Energiemenge werden daher auch Ladeleistung, Speicherbedarf, Verfügbarkeit von Netzanschlüssen, Baustellenlogistik und die räumliche Integration der Versorgungseinheiten berücksichtigt.

**Technologische Annahmen für 2027, 2040 und 2050**

Für das Betrachtungsjahr 2027 wird zunächst die kurzfristige Einsatzfähigkeit der im Bauprozess erforderlichen Maschinen und Fahrzeuge untersucht. Maßgeblich ist, welche Antriebstechnologien zum Zeitpunkt der Untersuchung bereits am Markt verfügbar oder kurzfristig realistisch einsetzbar sind (Abbildung 24). Elektrifizierte Maschinen und Fahrzeuge werden im Szenario vorrangig berücksichtigt. Bauprozesse bzw. Maschinengruppen, für die kurzfristig keine geeigneten elektrifizierten Alternativen verfügbar sind, werden weiterhin mit diesel- bzw. HVO-betriebenen Maschinen abgebildet. Wasserstoffbasierte Anwendungen werden gesondert gekennzeichnet, da sie im betrachteten Marktumfeld überwiegend Pilot- oder Entwicklungsfahrzeuge darstellen und noch nicht als breit verfügbare Serienlösung angesetzt werden können.

Die Betrachtungsjahre 2040 und 2050 basieren auf den zuvor erarbeiteten Erkenntnissen zur Technologieentwicklung, zur erwarteten Verfügbarkeit elektrifizierter Gerätetechnik sowie zur Weiterentwicklung der Energie- und Ladeinfrastruktur. Für 2040 wird eine weitgehende Elektrifizierung der relevanten Maschinenketten angenommen. Für 2050 wird zusätzlich ein weiterer technologischer Fortschritt berücksichtigt, insbesondere durch höhere Energieeffizienz, verbesserte Batteriekapazitäten, optimierte Ladeprozesse und eine leistungsfähigere Integration der Energieversorgung in die Baustellenlogistik.




*Abbildung 24: Einordnung der eingesetzten Maschinen und Fahrzeuge nach verfügbarer Antriebstechnologie für das Betrachtungsjahr 2027 (eigene Darstellung)*

### Energiebedarf und Versorgungskonzepte

Der nach Bauphasen und Energieträgern differenzierte Energiebedarf für die Betrachtungsjahre 2027, 2040 und 2050 ist in Tabelle 8 zusammengefasst. Darauf aufbauend werden die erforderliche Energieversorgung, der daraus resultierende Flächenbedarf und die baustellenlogistischen Anforderungen eingeordnet.

Aufbauend auf dem maximalen täglichen Energiebedarf je Bauphase wird anschließend betrachtet, welche Anforderungen sich daraus an die Energieversorgung auf der Baustelle ergeben. Maßgeblich ist hierbei nicht der gesamte Energiebedarf über die gesamte Sanierungsmaßnahme, sondern der jeweilige Spitzenbedarf innerhalb eines Arbeitstages. Dieser bestimmt, welche Energiemenge kurzfristig bereitgestellt werden muss und welche Versorgungsoptionen für den Baustellenbetrieb grundsätzlich geeignet sind.

Eine Zuordnung der ermittelten Spitzenbedarfe zu den Betrachtungsjahren 2027, 2040 und 2050 findet sich in Abbildung 25 und Tabelle 8. Daraus lässt sich ableiten, welche Energieversorgungskonzepte unter den jeweiligen technologischen Rahmenbedingungen für das betrachtete Sanierungsszenario geeignet sind. Den Infrastrukturszenarien liegt die Annahme zugrunde, dass keine stationären Versorgungslösungen zur Verfügung stehen.

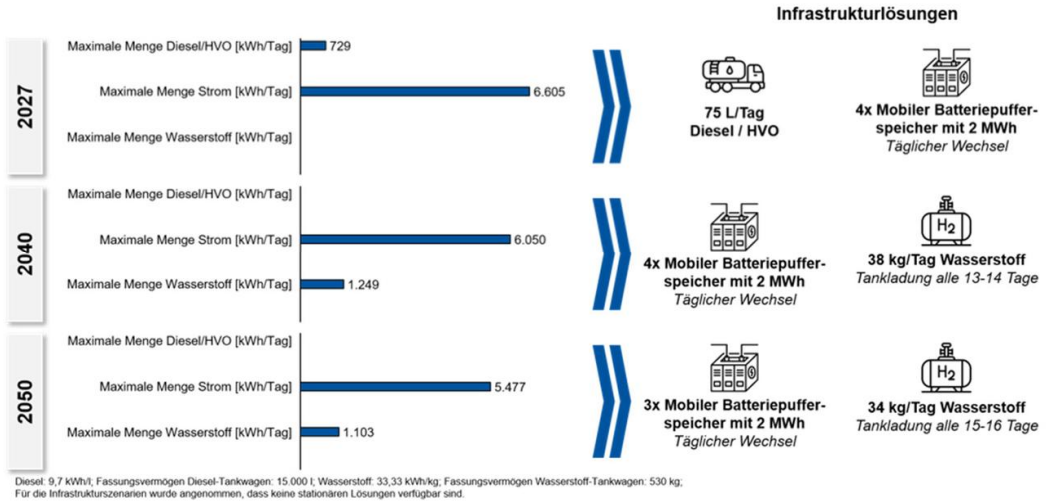



*Abbildung 25: Erforderliche Energieversorgung auf Grundlage des maximalen täglichen Energiebedarfs für die grundhafte Sanierung einer Asphaltstraße mit Walzasphalt.*

*Tabelle 8: Energiebedarf des Szenarios der grundhaften Sanierung einer Asphaltstraße mit Walzasphalt differenziert nach Betrachtungsjahr und Energieträger*

| Bauphase | 2027 | | | 2040 | | | 2050 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Diesel/ HVO | Strom | Wasser-stoff | Diesel/ HVO | Strom | Wasser-stoff | Diesel/ HVO | Strom | Wasser-stoff |
| Verkehrssicherung MÜF | - | 573 | - | - | 503 | - | - | 456 | - |
| Öffnung der MÜF | - | 286 | - | - | 252 | - | - | 228 | - |
| Aufbau der Verkehrssicherung 4+0 | - | 1.068 | - | - | 939 | - | - | 850 | - |
| Baustelleneinrichtung / Anlieferung der Maschinen | - | 818 | - | - | 719 | - | - | 650 | - |
| Asphaltdeckschicht fräsen | 729 | 3.157 | - | - | 2.900 | 1.249 | - | 2.625 | 1.103 |
| Binderschicht fräsen | 729 | 3.157 | - | - | 2.900 | 1.249 | - | 2.625 | 1.103 |
| Asphalttragschicht fräsen | 729 | 3.157 | - | - | 2.900 | 1.249 | - | 2.625 | 1.103 |
| Schottertragschicht ausbauen und einbauen, Planum herstellen | 245 | 3.493 | - | - | 3.349 | - | - | 3.032 | - |
| Asphalttragschicht herstellen | 406 | 6.605 | - | - | 6.050 | 400 | - | 5.477 | 353 |
| Binderschicht herstellen | 566 | 6.394 | - | - | 5.865 | 670 | - | 5.309 | 586 |
| Asphaltdeckschicht (Walzasphalt) herstellen | 566 | 6.394 | - | - | 5.865 | 670 | - | 5.309 | 586 |
| Bankette, Rinnen, Entwässerung instand setzen | 271 | 1.429 | - | - | 1.381 | 267 | - | 1.251 | 230 |
| Randabdichtung herstellen | 238 | 454 | - | - | 399 | 339 | - | 361 | 299 |
| Fugenarbeiten | 238 | 454 | - | - | 399 | 339 | - | 361 | 299 |
| Endmarkierung | - | 454 | - | - | 399 | - | - | 361 | - |
| Rückbau Verkehrssicherung 4+0 | - | 1.068 | - | - | 939 | - | - | 850 | - |
| Verkehrssicherung MÜF | - | 573 | - | - | 503 | - | - | 456 | - |
| Schließen der MÜF | - | 286 | - | - | 252 | - | - | 228 | - |
| Abbau der Verkehrssicherung | - | 573 | - | - | 503 | - | - | 456 | - |

Die Energiebedarfe sind in kWh/Arbeitstag (8 Stunden) angegeben.

## Betrachtungsjahr 2027

Für 2027 ergibt sich eine kombinierte Versorgung aus konventionellem Kraftstoff und mobiler elektrischer Speicherinfrastruktur. Elektrifizierte Maschinen

und Fahrzeuge werden dort eingesetzt, wo sie auf Grundlage der Marktverfügbarkeit und technischen Einsatzfähigkeit bereits realistisch in den Bauprozess integriert werden können. Für nicht oder noch nicht ausreichend elektrifizierte Maschinengruppen wird weiterhin Diesel bzw. HVO berücksichtigt. Im Szenario ergibt sich hierfür ein täglicher Bedarf von ca. 729 l Diesel bzw. HVO. Ergänzend werden für die elektrifizierten Maschinen vier mobile Batteriepufferspeicher mit jeweils 2 MWh Kapazität angesetzt, die täglich gewechselt bzw. nachgeladen werden.

**Betrachtungsjahr 2040**

Für 2040 zeigt sich auf Grundlage der zuvor erarbeiteten Technologie- und Trendanalyse eine deutlich weitergehende Elektrifizierung der Maschinenketten. Die Baustellenversorgung verlagert sich entsprechend weitgehend auf elektrische Energie. Im betrachteten Szenario wird hierfür der Einsatz von vier mobilen Batteriepufferspeichern mit jeweils 2 MWh Kapazität angesetzt. Diese dienen dazu, den täglichen Spitzenbedarf der elektrifizierten Bauprozesse bereitzustellen und die Ladeanforderungen zeitlich sowie räumlich vom unmittelbaren Netzanschluss zu entkoppeln. Ergänzend wird für spezifische Anwendungen ein Wasserstoffbedarf von ca. 38 kg pro Tag berücksichtigt. Die Energieversorgung besteht damit im Jahr 2040 im Wesentlichen aus mobiler elektrischer Speicherinfrastruktur, ergänzt durch eine begrenzte Wasserstoffversorgung.

**Betrachtungsjahr 2050**

Für 2050 wird eine weitere technologische Verbesserung der elektrifizierten Gerätetechnik und der zugehörigen Versorgungsinfrastruktur berücksichtigt. Durch höhere Energieeffizienz, verbesserte Batteriekapazitäten und optimierte Ladeprozesse reduziert sich der Bedarf an mobiler Speicherkapazität gegenüber 2040. Im betrachteten Szenario werden drei mobile Batteriepufferspeicher mit jeweils 2 MWh Kapazität angesetzt. Ergänzend ergibt sich ein Wasserstoffbedarf von ca. 34 kg pro Tag. Die Energieversorgung wird damit weiterhin überwiegend elektrisch abgebildet, wobei Wasserstoff als ergänzende Versorgungsoption für spezifische leistungsintensive oder schwer batterieelektrisch abbildbare Anwendungen berücksichtigt wird.

Insgesamt zeigt die Betrachtung, dass die Auslegung der Energieversorgung maßgeblich vom maximalen täglichen Energiebedarf der jeweiligen Bauphase bestimmt wird. Während 2027 noch eine hybride Versorgung aus Diesel bzw. HVO und mobiler elektrischer Speicherinfrastruktur erforderlich ist, verschiebt sich der Schwerpunkt in den Jahren 2040 und 2050 deutlich in Richtung elektrischer Versorgungssysteme mit ergänzender Wasserstoffbereitstellung.

**Räumliche und organisatorische Integration**

Nach Ableitung der erforderlichen Energieinfrastruktur ist für die praktische Umsetzung entscheidend, wie diese räumlich und organisatorisch in den Baustellenbetrieb integriert werden kann. Die reine Dimensionierung von mobilen Batteriespeichern, Wasserstoffversorgung oder konventioneller Kraftstoffbereitstellung reicht hierfür nicht aus. Maßgeblich ist vielmehr, wo Lade- und Betankungsvorgänge innerhalb oder außerhalb des Baufeldes erfolgen können, ohne den Bauablauf wesentlich zu beeinträchtigen.

Nicht alle Maschinen und Fahrzeuge müssen unmittelbar im Baufeld geladen oder betankt werden. Abhängig von Mobilitätsgrad, Einsatzdauer, Energiebedarf und Einbindung in die Maschinenkette kommen unterschiedliche Versorgungsorte infrage. Kontinuierlich eingesetzte Maschinen sind möglichst direkt im Baufeld oder in unmittelbarer Nähe ihres Einsatzortes zu versorgen.

Mobilere Maschinen und Fahrzeuge können hingegen gesonderte Lade- und Betankungsbereiche auf der Baustelle oder externe Einrichtungen wie Betriebshöfe, Bereitstellungsflächen und Ladestationen nutzen. Eine beispielhafte Anordnung dieser Bereiche bei einer 4+0-Verkehrsführung veranschaulicht Abbildung 26. Unterschieden wird zwischen der Versorgung im Baufeld, in einem gesonderten Ladebereich und über externe Infrastruktur.

Die Nutzung eines gesperrten PWC als gesonderter Lade- und Betankungsbereich kann insbesondere bei eingeschränkten Platzverhältnissen im unmittelbaren Baustellenbereich eine geeignete Alternative darstellen. Die erforderliche Energieinfrastruktur, beispielsweise mobile Batteriespeicher, Ladeeinrichtungen oder Wasserstoffversorgung, kann dadurch räumlich aus dem Baufeld ausgelagert werden. Sofern auf dem PWC bereits geeignete Stromanschlüsse oder erweiterbare elektrische Anschlussmöglichkeiten vorhanden sind, können diese unter Berücksichtigung der erforderlichen Anschlussleistung gegebenenfalls in das Versorgungskonzept eingebunden werden.

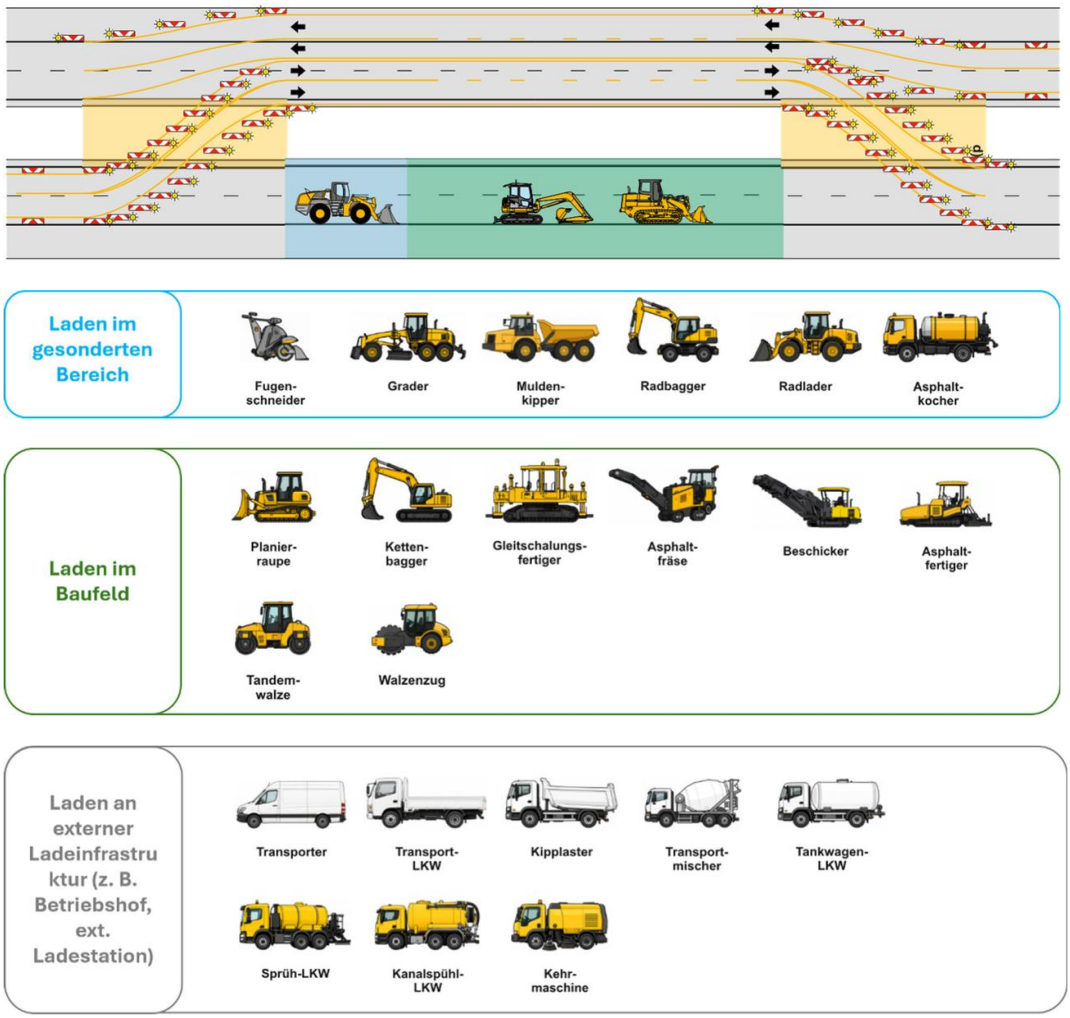



*Abbildung 26: Schematische Anordnung von Lade- und Betankungsbereichen innerhalb eines Autobahn-Baustellenbereichs mit 4+0-Verkehrsführung (eigene Darstellung)*

Ein ausgelagerter Versorgungsbereich verursacht zugleich zusätzlichen baustellenlogistischen Aufwand. Maschinen und Fahrzeuge müssen gezielt zum PWC geführt und nach dem Laden oder Betanken erneut in den Bauablauf integriert werden. Dies kann zusätzliche Fahrzeiten, einen erhöhten Koordinationsbedarf und Anpassungen der Prozessabläufe nach sich ziehen. Ob ein PWC als Versorgungsstandort geeignet ist, muss daher projektspezifisch anhand seiner Entfernung zur Baustelle, Erreichbarkeit, verfügbaren Fläche, vorhandenen Anschlüsse und betrieblichen Anforderungen geprüft werden. Abbildung 27 zeigt eine schematische Darstellung. In diesem Beispiel wäre der gesamte Parkplatz gesperrt und würde vollständig für die Versorgung der Baustelle genutzt werden.

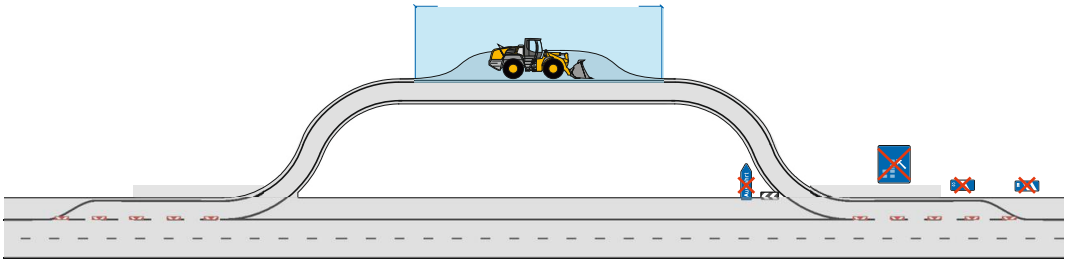


*Abbildung 27: Alternative Möglichkeit: Installation der Ladeinfrastruktur auf einem gesperrten PWC (eigene Darstellung)*

Die Verteilung zeigt, dass ein wesentlicher Anteil der bereitzustellenden Energie nicht unmittelbar im Baufeld, sondern über externe Infrastruktur abzudecken ist. Dies ist insbesondere auf mobile Fahrzeuge und Transportprozesse zurückzuführen, die nicht dauerhaft auf der Baustelle verbleiben. Hierzu zählen beispielsweise Transportfahrzeuge, Mischfahrzeuge, Kehrmaschinen, Sprühfahrzeuge oder weitere logistische Fahrzeuge, die regelmäßig zwischen Baustelle, Betriebshof, Mischanlage, Entsorgungsstelle oder anderen externen Zielpunkten verkehren. Für diese Fahrzeuge ist eine Versorgung außerhalb des unmittelbaren Baufeldes baustellenlogistisch sinnvoller, da sie ohnehin in übergeordnete Transport- und Logistikketten eingebunden sind.

Demgegenüber betrifft die Energiebereitstellung im Baufeld vor allem Maschinen, die kontinuierlich oder über längere Zeiträume direkt in den Bauprozess eingebunden sind. Hierzu zählen insbesondere Geräte der Einbau- und Verdichtungskette sowie Maschinen, deren Herauslösen aus dem Baufeld zu Unterbrechungen im Bauablauf führen würde. Der gesonderte Ladebereich innerhalb des Baustellenbereichs übernimmt eine Zwischenfunktion für Maschinen, die zwar dem Baustellenbetrieb zugeordnet sind, jedoch nicht dauerhaft im unmittelbaren Arbeitsbereich geladen oder betankt werden müssen.

Diese Struktur entspricht grundsätzlich auch der heutigen Baustellenpraxis, da viele dieser Fahrzeuge bereits heute nicht im Baufeld betankt werden. Mit zunehmender Elektrifizierung verändert sich daher nicht zwangsläufig der Versorgungsort dieser Fahrzeuge, sondern vor allem die Anforderungen an die externe Energieinfrastruktur. Entscheidend ist, dass geeignete Lade- oder Betankungsmöglichkeiten in Baustellennähe, entlang der Transportwege oder an Betriebshöfen bzw. Niederlassungen verfügbar sind.

Für bauprozessgebundene Maschinen, die überwiegend im Baufeld eingesetzt werden, bleibt dagegen eine baustellennahe Versorgung erforderlich, um Unterbrechungen im Bauablauf zu vermeiden. Die Versorgungsstrategie muss daher zwischen baufeldgebundenen Maschinen und mobilen Fahrzeugen mit externen Umläufen unterscheiden. Dadurch kann der Platzbedarf im

unmittelbaren Baufeld reduziert und die Energieversorgung an die tatsächlichen Einsatz- und Bewegungsprofile der Maschinen und Fahrzeuge angepasst werden.

**Betriebsweise von Brennstoffzellengeneratoren und Batteriespeichern**

Aus der Zuordnung der Energiebedarfe zu den jeweiligen Lade- und Versorgungsbereichen ergibt sich, dass bauprozessgebundene Maschinen weiterhin eine baustellennahe Energieversorgung benötigen (Abbildung 28). Dabei ist nicht nur die insgesamt bereitzustellende Energiemenge maßgebend, sondern insbesondere das zeitliche Lastprofil der Verbraucher.

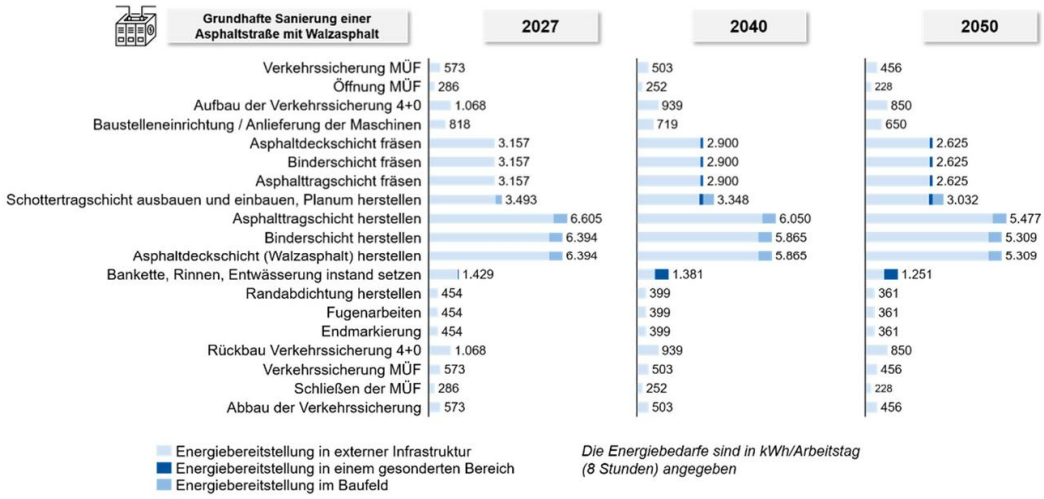



*Abbildung 28: Zuordnung der Energiebedarfe für die Jahre 2027, 2040 und 2050 nach Versorgungsbereich für die grundhafte Sanierung einer Asphaltstraße mit Walzasphalt.*

Baustellenprozesse weisen typischerweise wechselnde Leistungsanforderungen auf. Maschinen werden nicht dauerhaft mit konstanter Leistung betrieben, sondern rufen abhängig von Bauablauf, Taktzeiten, Stillstandszeiten und kurzfristigen Lastspitzen unterschiedlich viel Energie ab.

Für die Bereitstellung elektrischer Energie vor Ort kommen daher insbesondere kombinierte Versorgungssysteme aus Brennstoffzellengenerator und Batteriespeicher in Betracht. Die Wirtschaftlichkeit eines Brennstoffzellengenerators hängt jedoch wesentlich von seiner Betriebsweise ab. Ein effizienter und langlebiger Betrieb wird vor allem dann erreicht, wenn der Generator möglichst nahe an einem stabilen Betriebspunkt betrieben wird. Starke Lastwechsel, häufige Leistungsänderungen oder der dauerhafte Betrieb in ungünstigen Teillast- bzw. Spitzenlastbereichen können demgegenüber zu geringerer Effizienz und höherer Systembelastung führen.

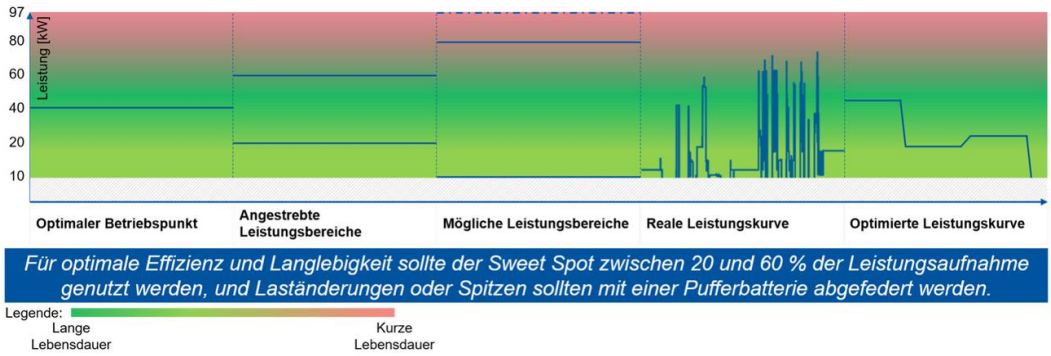



*Abbildung 29: Einfluss der Betriebsweise auf Effizienz, Lebensdauer und Wirtschaftlichkeit eines Brennstoffzellengenerators.*

Dieser Zusammenhang wird in Abbildung 29 veranschaulicht. Der optimale Betriebspunkt kennzeichnet einen Bereich mit möglichst konstanter Leistungsabgabe, in dem ein hoher Wirkungsgrad bei geringer Systembelastung erreicht werden kann. Die technisch möglichen Leistungsbereiche sind zwar weiter gefasst, erlauben jedoch nicht zwangsläufig einen wirtschaftlichen oder verschleißarmen Betrieb. Eine reale Leistungskurve mit wechselnden Lastanforderungen lässt sich grundsätzlich durch einen Brennstoffzellengenerator abbilden, die häufigeren Lastwechsel erhöhen jedoch die Beanspruchung der Brennstoffzelle.

Aus diesem Grund ist für den Baustelleneinsatz eine optimierte Betriebsweise anzustreben. Dabei wird der Brennstoffzellengenerator möglichst gleichmäßig in einem günstigen Leistungsbereich betrieben, während kurzfristige Laständerungen und Leistungsspitzen über eine Pufferbatterie ausgeglichen werden. Der Batteriespeicher übernimmt somit eine zentrale Funktion zwischen Energieerzeugung und Verbrauchern: Er entkoppelt die dynamischen Leistungsanforderungen der Maschinen von der möglichst konstanten Leistungsabgabe des Generators. Dadurch können Effizienz, Lebensdauer und Wirtschaftlichkeit des Gesamtsystems verbessert werden.

Um die Anforderungen des Baustellenbetriebs mit einer möglichst effizienten Betriebsweise der Energieerzeugung zu verbinden, kommt Batteriespeichern eine zentrale Rolle zu. Sie ermöglichen die technische Kopplung zwischen gleichmäßig betriebenen Stromquellen, wie beispielsweise Brennstoffzellengeneratoren oder begrenzten Netzanschlüssen, und den stark schwankenden Leistungsanforderungen der eingesetzten Maschinen und Fahrzeuge (Abbildung 30).




*Abbildung 30: Beispielhafte Anwendung eines mobilen Batteriespeichersystems zur Versorgung elektrischer Baumaschinen.*

Mobile Batteriespeichersysteme übernehmen im Versorgungskonzept eine zentrale Puffer- und Kopplungsfunktion Sie speichern Energie aus vorgelagerten Quellen wie einem Netzanschluss oder Brennstoffzellengenerator und stellen sie bedarfsgerecht für die Verbraucher auf der Baustelle bereit. Auf diese Weise lassen sich Lastspitzen glätten und kurzfristig hohe Ladeleistungen ermöglichen, ohne die vorgelagerte Energiequelle dauerhaft auf die maximale Spitzenlast auslegen zu müssen. Dies ist für Baustellen besonders relevant, da elektrische Baumaschinen häufig kurze, leistungsintensive Ladefenster benötigen, während Energieerzeugung und Netzeinspeisung möglichst gleichmäßig und effizient erfolgen sollten. Die schematische Einbindung des Batteriespeichers zwischen Stromquelle und Verbraucher ist in der zugehörigen Abbildung 31 dargestellt.

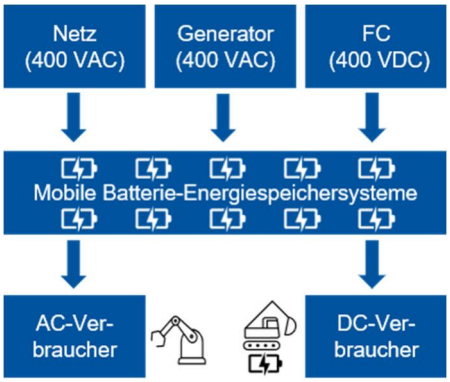



*Abbildung 31: Mobile Batteriespeichersysteme als Kopplungselement zwischen Stromquellen und Verbrauchern auf der Baustelle (AC: Wechselstrom; DC: Gleichstrom; FC: Brennstoffzelle).*

Über die Pufferfunktion hinaus bieten mobile Batteriespeichersysteme weitere Vorteile für den Baustelleneinsatz. Ihr modularer Aufbau ermöglicht eine projektspezifische Dimensionierung und die Bereitstellung in containerisierten Einheiten. Je nach Auslegung können unterschiedliche Spannungsbereiche sowie Gleich- und Wechselstromanwendungen abgedeckt werden.

Damit eignen sich diese Systeme besonders für temporäre Baustellen mit hohen Ladeleistungen und begrenzter Netzanschlusskapazität. Einen beispielhaften Aufbau eines containerisierten Batteriespeichersystems veranschaulicht Abbildung 32.

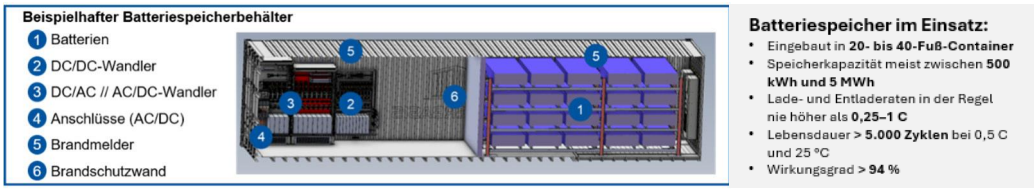



*Abbildung 32: Beispielhafter Aufbau eines containerisierten mobilen Batteriespeichersystems (Darstellung der RWTH Aachen).*

Darauf aufbauend wird eine beispielhafte Energieversorgung auf der Baustelle oder in einem gesonderten Ladebereich untersucht (Abbildung 33). Dort werden mobile Batteriespeicher, ein Brennstoffzellengenerator und die erforderliche Ladeinfrastruktur räumlich gebündelt außerhalb des unmittelbaren Arbeitsbereichs angeordnet. Für das betrachtete Beispiel wird eine Kombination aus zwei mobilen Batteriespeichern mit jeweils 400 kVA und einem $H_2$-Generator mit 80 kW zugrunde gelegt. Deren schematische Anordnung auf der Baustelle ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

Im nächsten Schritt wird betrachtet, wie sich der Speicherzustand der Batteriespeicher über den Tagesverlauf entwickelt. Untersucht wird, ob die Kombination aus Batteriespeichern, $H_2$-Generator und ergänzendem Baustromanschluss ausreicht, um die Ladebedarfe der im Baufeld eingesetzten Geräte außerhalb der Arbeitszeiten abzudecken.

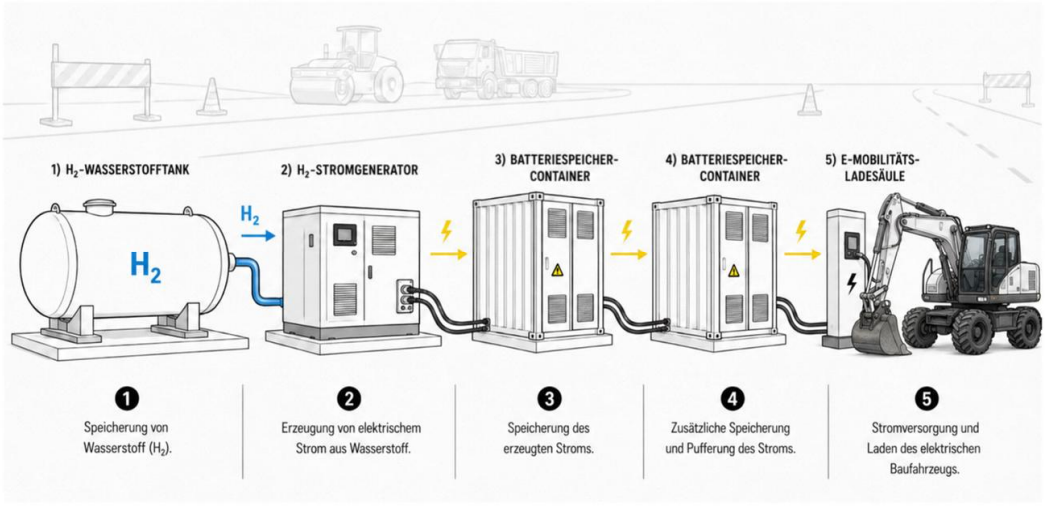



*Abbildung 33: Beispielhafte Darstellung der Energieversorgung auf der Baustelle in einem gesonderten dafür vorgesehenen Bereich (eigene Darstellung)*

Für das betrachtete Szenario wird davon ausgegangen, dass das Laden der Geräte im Baufeld außerhalb der eigentlichen Arbeitszeiten erfolgt. Hierzu werden insbesondere die Mittagspause im Zeitraum von 12:00 – 13:00 Uhr sowie der Zeitraum ab ca. 17:00 Uhr berücksichtigt. Die Energiezufuhr erfolgt im gesonderten Ladebereich über einen Baustromanschluss mit einer Leistung von 10 kW sowie über einen Brennstoffzellengenerator, der im optimalen Lastbereich mit einer konstanten Leistung von 40 kW betrieben wird. Die Batteriespeicher dienen dabei als Zwischenspeicher, um die gleichmäßige Energieerzeugung mit den zeitlich konzentrierten Ladebedarfen der Baumaschinen zu koppeln.

Die in Abbildung 34 dargestellten Speicherzustände zeigen, dass die Energiebereitstellung im Baufeld grundsätzlich abgebildet werden kann. Durch den kombinierten Einsatz aus Baustrom, Brennstoffzellengenerator und Batteriespeicher können die Ladevorgänge außerhalb der Arbeitszeiten zeitlich gebündelt werden, ohne dass der Brennstoffzellengenerator dauerhaft lastwechselintensiv betrieben werden muss. Die Batteriespeicher übernehmen hierbei die Funktion, Energie über den Tagesverlauf aufzunehmen und für die Ladefenster der Baumaschinen bereitzustellen.

Für das Betrachtungsjahr 2027 wird dabei angenommen, dass der Batteriespeicher zu Beginn des Einsatzes mit einem Ladezustand von 50 % angeliefert wird. Im betrachteten Szenario der grundhaften Sanierung zeigt sich, dass die vorhandene Energielösung nicht ausreicht, um den Speicher über den gesamten Einsatzzeitraum vollständig zu stabilisieren. Vielmehr sinkt der

Ladezustand kontinuierlich, sodass der Batteriespeicher im Beispiel nach rund fünf Tagen entladen ist.

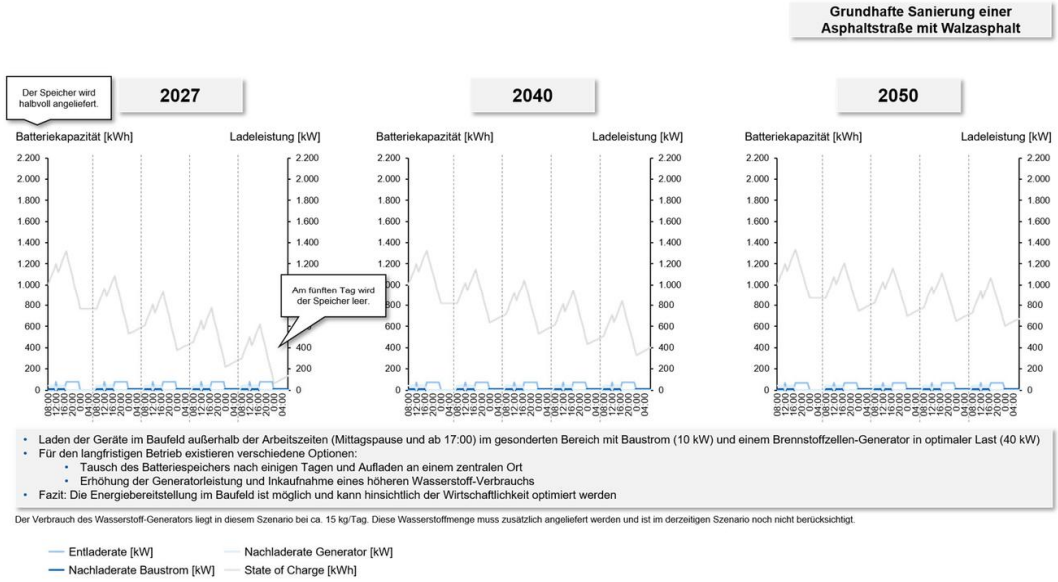



*Abbildung 34: Speicherzustände der Batteriespeicher im Tagesverlauf für die Betrachtungsjahre 2027, 2040 und 2050 für die grundhafte Sanierung einer Asphaltstraße mit Walzasphalt.*

Für den langfristigen Betrieb bestehen verschiedene Optimierungsoptionen. Eine Möglichkeit ist der regelmäßige Austausch der Batteriespeicher nach mehreren Tagen und das anschließende Laden an einem zentralen Standort. Alternativ kann die Leistung des Brennstoffzellengenerators erhöht werden, wodurch sich die Ladefähigkeit vor Ort verbessert, jedoch auch ein höherer Wasserstoffverbrauch entsteht. Der Brennstoffzellengenerator wird in diesem Anwendungsfall bei Bedarf zugeschaltet. Im betrachteten Szenario aus Abbildung 34 beträgt dessen Einschaltdauer 8 Stunden pro Tag, was zu einem zusätzlichen Verbrauch von ca. 15 kg Wasserstoff pro Tag führt. Diese Wasserstoffmenge muss zusätzlich angeliefert werden und ist in der bisherigen Gesamtbetrachtung der Energieversorgung noch nicht enthalten.

Die Energiebereitstellung im Baufeld ist damit grundsätzlich möglich, erfordert jedoch eine abgestimmte Dimensionierung von Batteriespeicher, Brennstoffzellengenerator und Ladezeiten. Insbesondere die zusätzliche Wasserstoffversorgung sowie der mögliche Austausch bzw. externe Ladevorgang der Batteriespeicher sind bei der baustellenlogistischen Bewertung zu berücksichtigen.

**Flächenbedarf und Anordnung im Baustellenbereich**

Für die Betrachtungsjahre 2040 und 2050 verlängert sich der Speicherzyklus. Ursächlich hierfür sind insbesondere die zugrunde gelegten technologischen Weiterentwicklungen, wie eine höhere Energieeffizienz der eingesetzten Maschinen, verbesserte Batteriesysteme sowie eine insgesamt optimierte Einbindung der Energieversorgung in den Baustellenbetrieb. Die dargestellten Speicherverläufe verdeutlichen damit, dass die Energiebereitstellung im Baufeld grundsätzlich möglich ist, die Dauer der autarken Versorgung jedoch wesentlich vom jeweiligen Betrachtungsjahr und der technologischen Entwicklung abhängt.

Für die baubetriebliche Bewertung ist neben der technischen Funktionalität auch der erforderliche Flächenbedarf der Energieversorgung zu berücksichtigen. Beim Laden in einem gesonderten Ladebereich werden die hierfür erforderlichen Komponenten – beispielsweise $H_2$-Tank, $H_2$-Generator, Batteriespeicher und Ladesäule – in einem temporär eingerichteten Bereich gebündelt angeordnet (Abbildung 35). Dieser Ladebereich kann je nach örtlichen Gegebenheiten innerhalb des Baustellenbereichs oder auf einer geeigneten externen Fläche, beispielsweise einer nahegelegenen PWC-Anlage, eingerichtet werden. In der Regel erfolgt die Einrichtung zu Beginn der Baumaßnahme einmalig, nach Abschluss der Maßnahme wird der Bereich wieder zurückgebaut.

Für die Versorgung von Fahrzeugen und Maschinen im unmittelbaren Baufeld ist ein gesonderter Ladebereich jedoch nicht in jedem Fall ausreichend. Insbesondere bei bauprozessgebundenen Maschinen kann eine Fahrt zum Ladebereich aufgrund des Baufortschritts, der Einbindung in die Prozesskette oder der erforderlichen kontinuierlichen Verfügbarkeit zu Unterbrechungen und Beeinträchtigungen des Bauablaufs führen. Dies gilt auch dann, wenn sich der Ladebereich innerhalb des Baustellenbereichs befindet. Für solche Maschinen ist daher eine flexible und möglichst prozessnahe Energieversorgung erforderlich. Hierfür eignen sich mobile Speicher- und Ladelösungen, beispielsweise ein Batteriespeicher auf einem Auflieger mit integrierter Ladeeinrichtung, der bedarfsgerecht innerhalb des Baufelds positioniert und dem Baufortschritt folgend umgesetzt werden kann (Abbildung 35).

Die Draufsicht in der folgenden Abbildung veranschaulicht eine mögliche Anordnung der Energieversorgung entlang der Fahrbahn (Abbildung 36). Die temporäre Energielösung lässt sich in Längsrichtung platzieren und beansprucht dabei ungefähr die Breite eines Fahr- oder Standstreifens. Ein zusätzlicher Fahrstreifen wird benötigt, damit Fahrzeuge die Versorgungseinheit erreichen und dort geladen werden können.

Daraus ergibt sich, dass die Einbindung einer solchen Energielösung insbesondere auf mehrstreifigen Fahrbahnen grundsätzlich möglich sein kann, ohne den Verkehr vollständig auszuschließen. Je nach vorhandener Fahrbahnbreite und Verkehrsführung kann der Verkehr an der angeordneten Lade- und Energieinfrastruktur vorbeigeführt werden. Die konkrete Umsetzbarkeit ist dabei jedoch von den örtlichen Randbedingungen, dem verfügbaren Querschnitt sowie den Anforderungen an Verkehrsführung und Arbeitssicherheit abhängig und somit projektspezifisch festzulegen.

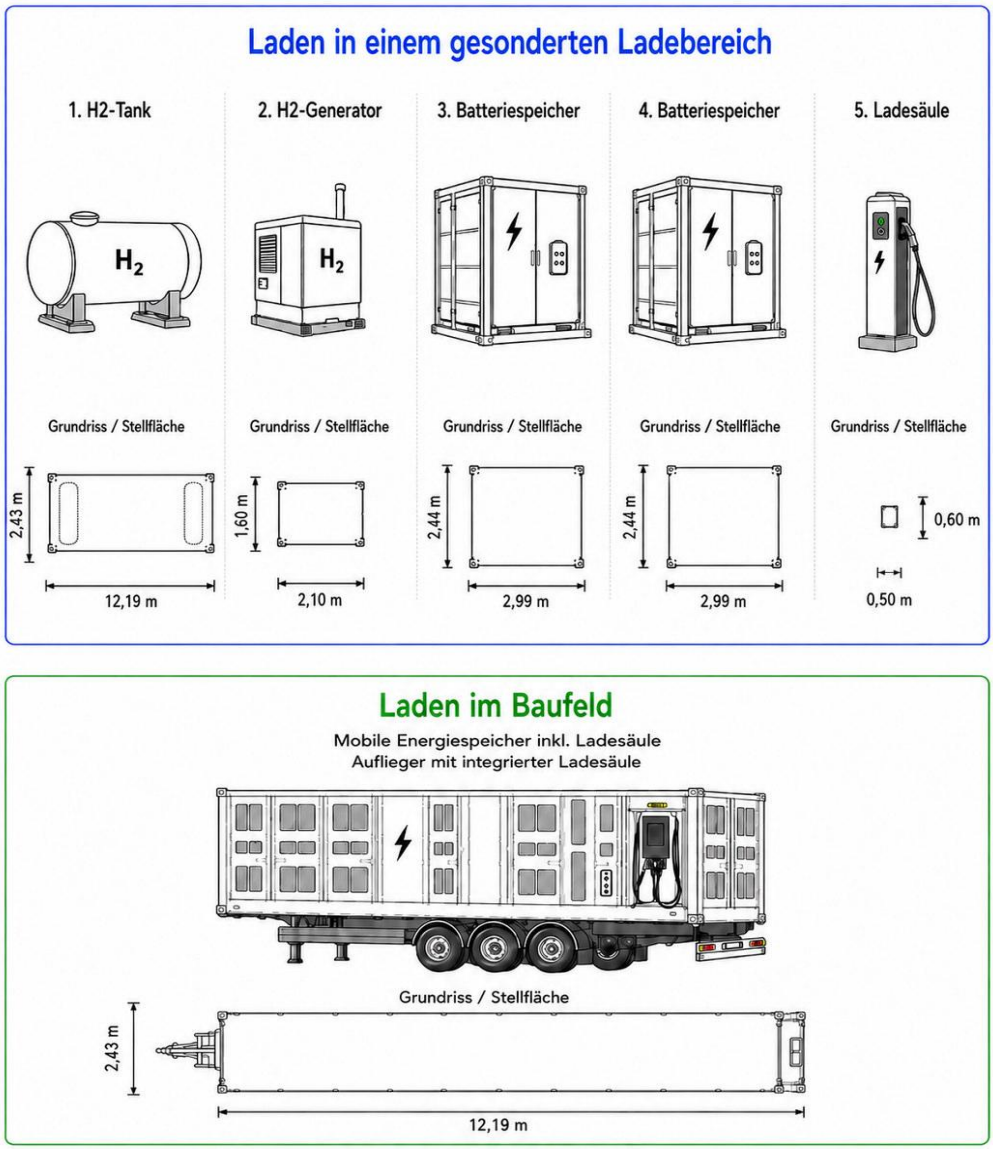



*Abbildung 35: Darstellung: Beispielhafte Anordnung der temporären Energieversorgung inklusive Abmessungen (schematische Darstellung, nicht maßstäblich); (eigene Darstellung)*

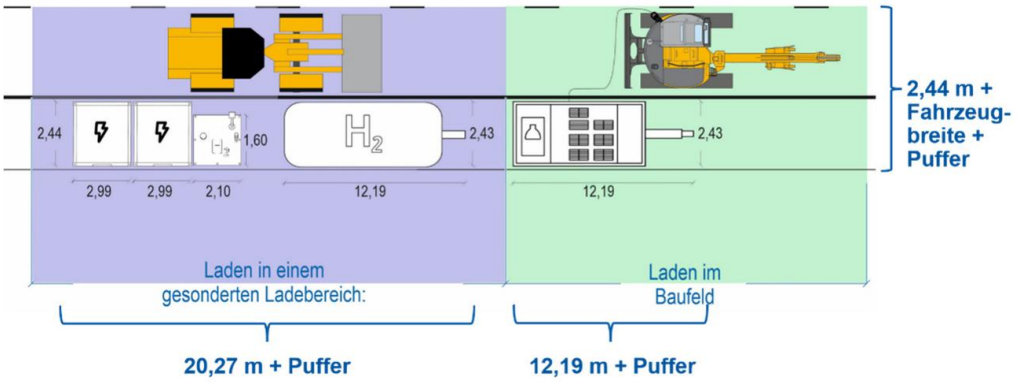



*Abbildung 36: Beispielhafte Darstellung für Anordnung der temporären Infrastruktur und Fahrzeuge auf einer Straßenbaustelle (eigene Darstellung)*

### 2.6.2 Beispiel: Grundhafte Sanierung / Asphaltstraße / Gussasphalt

Für die grundhafte Sanierung einer Asphaltstraße mit Gussasphalt wird die in Abschnitt 2.6.1 dargestellte Bewertungslogik analog angewendet.

Tabelle 9 zeigt den Energiebedarf des Szenarios für die Betrachtungsjahre 2027, 2040 und 2050 differenziert nach Energieträgern. Gegenüber der Walzasphaltvariante ergeben sich Unterschiede insbesondere aus dem abweichenden Bauverfahren, den ein-gesetzten Maschinenketten und den daraus resultierenden Energiebedarfen.

*Tabelle 9: Energiebedarf des Szenarios der grundhaften Sanierung einer Asphaltstraße mit Gussasphalt differenziert nach Betrachtungsjahr und Energieträger*

**Grundhafte Sanierung einer Asphaltstraße mit Gussasphalt**

| *Die Energiebedarfe sind in kWh/Arbeitstag (8 Stunden) angegeben.* | 2027 | | | 2040 | | | 2050 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Diesel/ HVO | Strom | Wasser-stoff | Diesel/ HVO | Strom | Wasser-stoff | Diesel/ HVO | Strom | Wasser-stoff |
| **Verkehrssicherung MÜF** | - | 573 | - | - | 503 | - | - | 456 | - |
| **Öffnung der MÜF** | - | 286 | - | - | 252 | - | - | 228 | - |
| **Aufbau der Verkehrssicherung 4+0** | - | 1.068 | - | - | 939 | - | - | 850 | - |
| **Baustelleneinrichtung / Anlieferung der Maschinen** | - | 818 | - | - | 719 | - | - | 650 | - |
| **Asphaltdeckschicht fräsen** | 7.068 | 3.157 | - | - | 2.900 | 1.249 | - | 2.625 | 1.103 |
| **Binderschicht fräsen** | 7.068 | 3.157 | - | - | 2.900 | 1.249 | - | 2.625 | 1.103 |
| **Asphalttragschicht fräsen** | 7.068 | 3.157 | - | - | 2.900 | 1.249 | - | 2.625 | 1.103 |
| **Schottertragschicht ausbauen und einbauen, Planum herstellen** | 2.375 | 3.493 | - | - | 3.349 | - | - | 3.032 | - |
| **Asphalttragschicht herstellen** | 3.938 | 6.605 | - | - | 6.050 | 400 | - | 5.477 | 353 |
| **Binderschicht herstellen** | 5.486 | 6.349 | - | - | 5.865 | 670 | - | 5.309 | 586 |
| **Asphaltdeckschicht (Gussasphalt) herstellen** | 7.695 | 153 | - | - | 846 | 350 | - | 776 | 303 |
| **Bankette, Rinnen, Entwässerung instand setzen** | 2.625 | 1.429 | - | - | 1.381 | 267 | - | 1.251 | 230 |
| **Randabdichtung herstellen** | 506 | 454 | - | - | 399 | 105 | - | 361 | 93 |
| **Fugenarbeiten** | 506 | 454 | - | - | 399 | 105 | - | 361 | 93 |
| **Endmarkierung** | - | 454 | - | - | 399 | - | - | 361 | - |
| **Rückbau Verkehrssicherung 4+0** | - | 1.068 | - | - | 939 | - | - | 850 | - |
| **Verkehrssicherung MÜF** | - | 573 | - | - | 503 | - | - | 456 | - |
| **Schließen der MÜF** | - | 286 | - | - | 252 | - | - | 228 | - |
| **Abbau der Verkehrssicherung** | - | 573 | - | - | 503 | - | - | 456 | - |

MÜF: Mittelstreifenüberfahrt

Der maximale tägliche Energiebedarf sowie dessen Zuordnung zu den Versorgungsbereichen sind in den Abbildung 37 und Abbildung 38 dargestellt. Der Verlauf des Speicherzustands im Baufeld ist Abbildung 39 zu entnehmen.

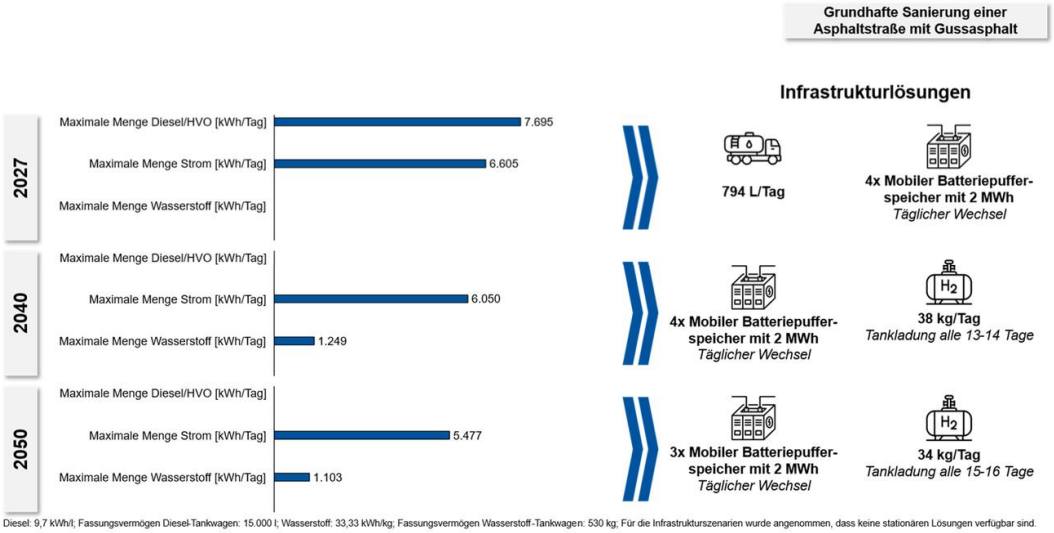



*Abbildung 37: Erforderliche Energieversorgung auf Grundlage des maximalen täglichen Energiebedarfs für die grundhafte Sanierung einer Asphaltstraße mit Gussasphalt.*

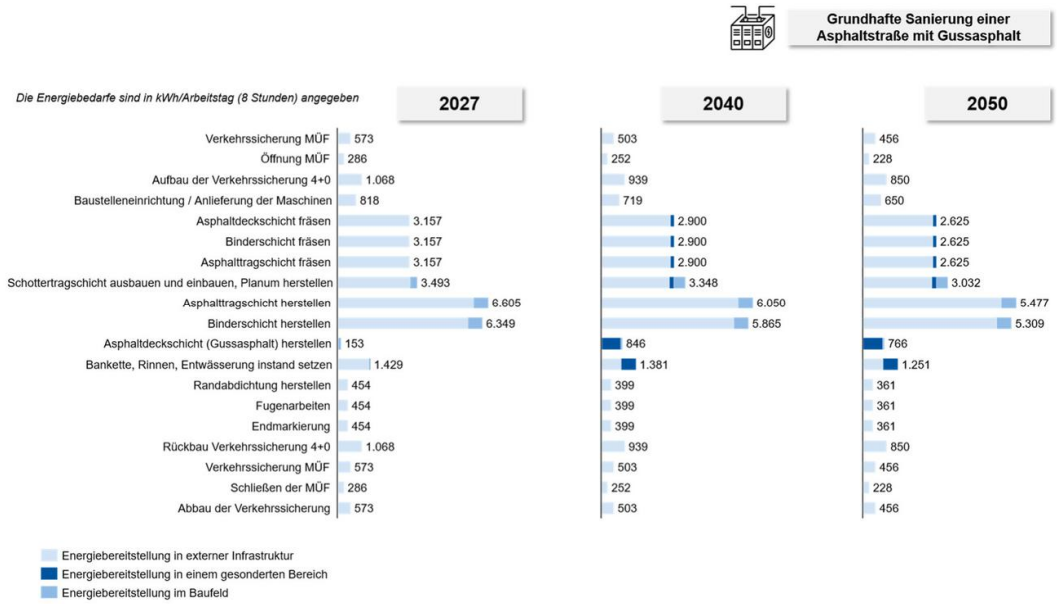



*Abbildung 38: Zuordnung der Energiebedarfe für die Jahre 2027, 2040 und 2050 nach Versorgungsbereich für die grundhafte Sanierung einer Asphaltstraße mit Gussasphalt.*

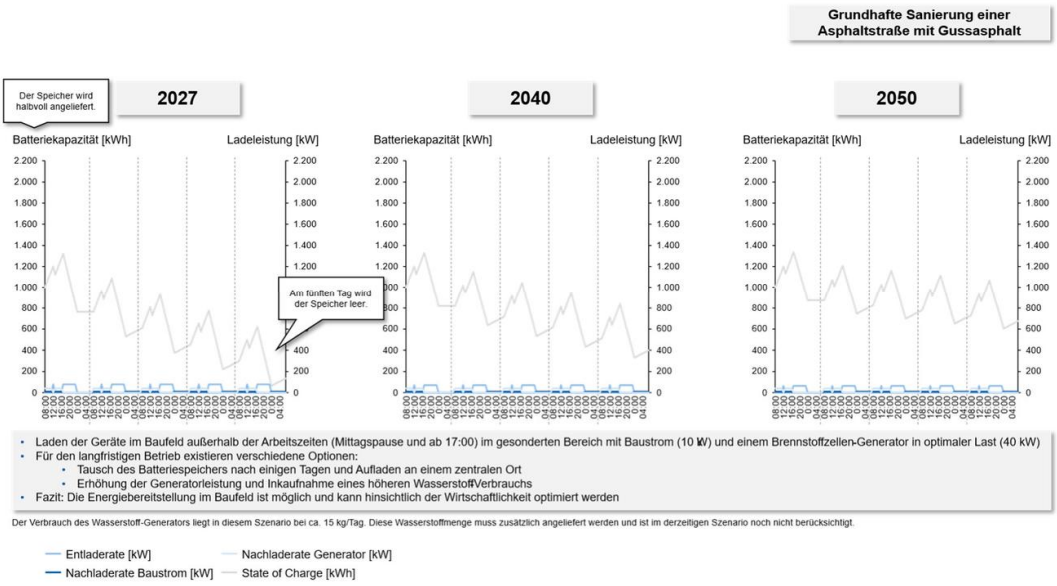



*Abbildung 39: Speicherzustände der Batteriespeicher im Tagesverlauf für die Betrachtungsjahre 2027, 2040 und 2050 für die grundhafte Sanierung einer Asphaltstraße mit Gussasphalt.*

Aus dem Speicherzustandsverlauf wird ersichtlich, dass der Batteriespeicher im Betrachtungsjahr 2027, ausgehend von einem anfänglichen Ladezustand

von 50 %, nach rund fünf Tagen entladen ist. Für 2040 und 2050 verlängert sich dieser Zeitraum infolge technologischer Verbesserungen. Die Energiebereitstellung im Baufeld ist damit grundsätzlich möglich, erfordert bei der grundhaften Sanierung jedoch eine engere Abstimmung von Speichergröße, Generatorleistung und Ladefenstern.

### 2.6.3 Beispiel: Grundhafte Sanierung einer Betonstraße

Für die grundhafte Sanierung einer Betonstraße wird ebenfalls die in Abschnitt 2.6.1 beschriebene Bewertungslogik angewendet. Der Energiebedarf des Szenarios ist für die Betrachtungsjahre 2027, 2040 und 2050 differenziert nach Energieträgern in Tabelle 10 dargestellt.

*Tabelle 10: Energiebedarf des Szenarios der grundhaften Sanierung einer Betonstraße differenziert nach Betrachtungsjahr und Energieträger*

**Grundhafte Sanierung einer Betonstraße**

| *Die Energiebedarfe sind in kWh/Arbeitstag (8 Stunden) angegeben.* | 2027 | | | 2040 | | | 2050 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Diesel/ HVO | Strom | Wasser-stoff | Diesel/ HVO | Strom | Wasser-stoff | Diesel/ HVO | Strom | Wasser-stoff |
| **Verkehrssicherung MÜF** | - | 573 | - | - | 503 | - | - | 456 | - |
| **Öffnung der MÜF** | - | 286 | - | - | 252 | - | - | 228 | - |
| **Aufbau der Verkehrssicherung 4+0** | - | 1.068 | - | - | 939 | - | - | 850 | - |
| **Baustelleneinrichtung / Anlieferung der Maschinen** | - | 818 | - | - | 719 | - | - | 650 | - |
| **Beton + Asphalt schneiden** | - | 62 | - | - | 54 | - | - | 49 | - |
| **Betonschicht aufbrechen und abtragen** | 1.076 | 3.422 | - | - | 3.132 | - | - | 2.836 | - |
| **Asphalttragschicht fräsen** | 7.068 | 3.157 | - | - | 2.900 | 1.249 | - | 2.625 | 1.103 |
| **Schottertragschicht ausbauen und einbauen, Planum herstellen** | 2.375 | 3.493 | - | - | 3.349 | - | - | 3.032 | - |
| **Asphalttragschicht herstellen** | 3.938 | 6.605 | - | - | 6.050 | 400 | - | 5.477 | 353 |
| **Betondeckschicht einbauen** | 4.525 | 6.422 | - | - | 195 | 9.036 | - | 177 | 7.806 |
| **Bankette, Rinnen, Entwässerung instand setzen** | 2.625 | 1.429 | - | - | 1.381 | 267 | - | 1.251 | 230 |
| **Randabdichtung herstellen** | 506 | 454 | - | - | 399 | 105 | - | 361 | 93 |
| **Fugenarbeiten** | 506 | 454 | - | - | 399 | 105 | - | 361 | 93 |
| **Endmarkierung** | - | 454 | - | - | 399 | - | - | 361 | - |
| **Rückbau Verkehrssicherung 4+0** | - | 1.068 | - | - | 939 | - | - | 850 | - |
| **Verkehrssicherung MÜF** | - | 573 | - | - | 503 | - | - | 456 | - |
| **Schließen der MÜF** | - | 286 | - | - | 252 | - | - | 228 | - |
| **Abbau der Verkehrssicherung** | - | 573 | - | - | 503 | - | - | 456 | - |

MÜF: Mittelstreifenüberfahrt

Der maximale tägliche Energiebedarf sowie dessen Zuordnung zu den Versorgungsbereichen sind in Abbildung 40 und Abbildung 41 dargestellt. Der Verlauf des Speicherzustands im Baufeld ist Abbildung 42 zu entnehmen.

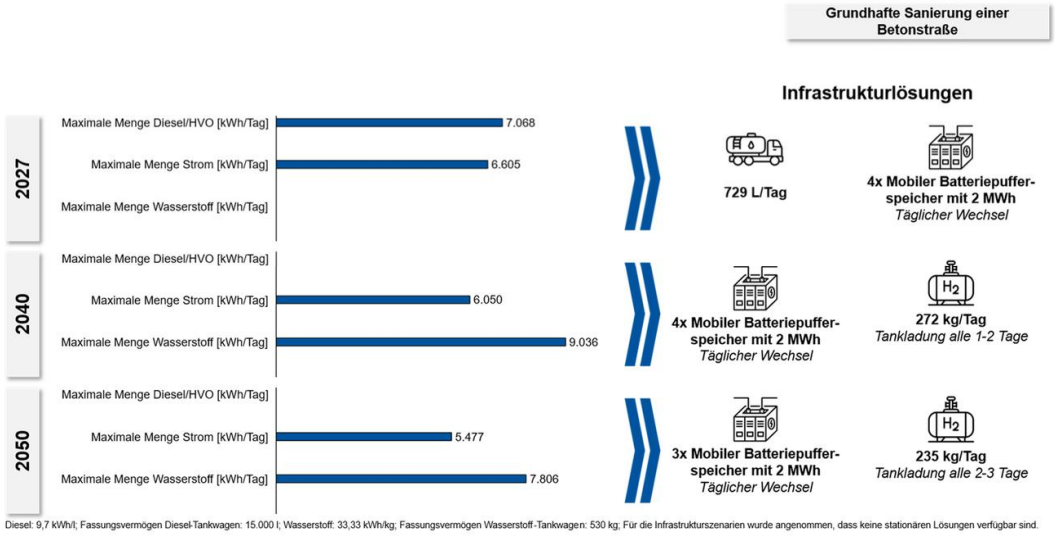



*Abbildung 40: Erforderliche Energieversorgung auf Grundlage des maximalen täglichen Energiebedarfs für die grundhafte Sanierung einer Betonstraße.*

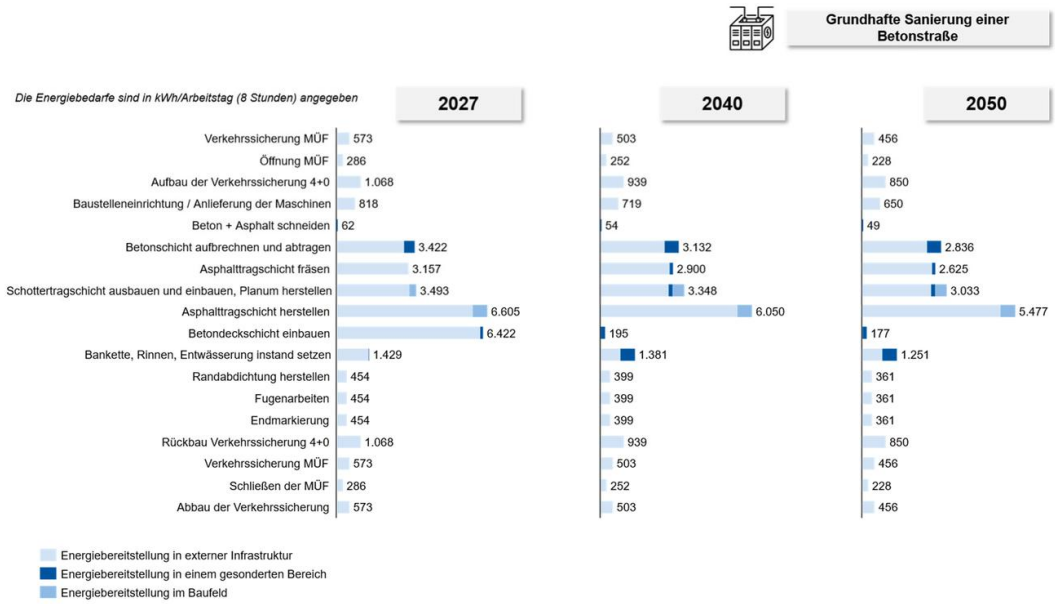



*Abbildung 41: Zuordnung der Energiebedarfe für die Jahre 2027, 2040 und 2050 nach Versorgungsbereich für die grundhafte Sanierung einer Betonstraße.*

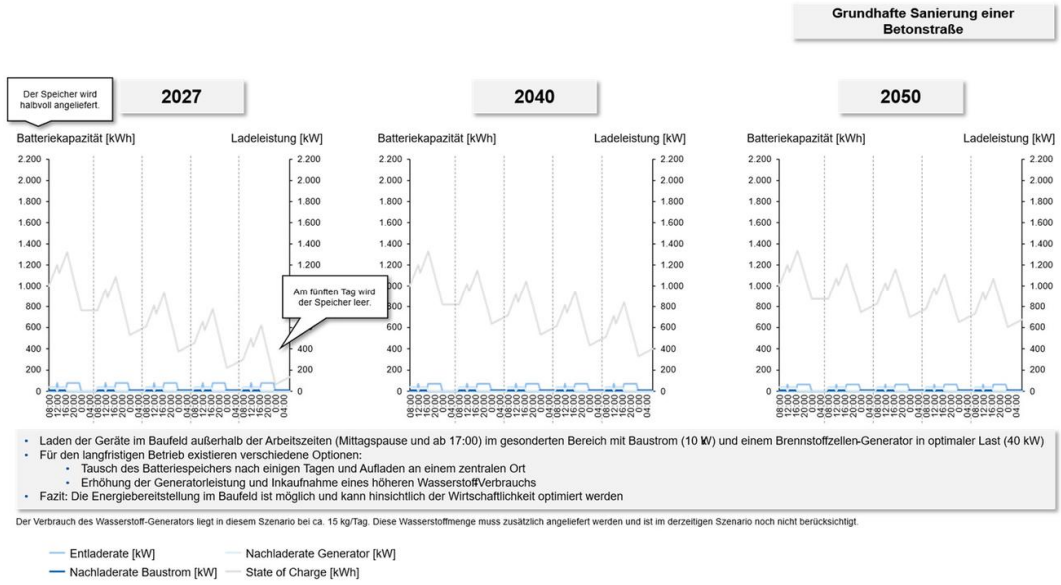



*Abbildung 42: Speicherzustände der Batteriespeicher im Tagesverlauf für die Betrachtungsjahre 2027, 2040 und 2050 für die grundhafte Sanierung einer Betonstraße.*

Auch bei der grundhaften Sanierung der Betonstraße zeigt der Speicherzustandsverlauf, dass der Batteriespeicher im Betrachtungsjahr 2027 bei einem anfänglichen Ladezustand von 50 % nach etwa fünf Tagen entladen ist. Für die Jahre 2040 und 2050 verlängert sich die mögliche Versorgungsdauer infolge der angenommenen technologischen Weiterentwicklung. Die Energieversorgung im Baufeld ist damit grundsätzlich realisierbar, erfordert jedoch auch hier eine auf den Bauablauf abgestimmte Dimensionierung von Speichergröße, Generatorleistung und Ladefenstern.

### 2.6.4 Beispiel: Deckensanierung einer Asphaltstraße mit Walzasphalt

Für die Deckensanierung einer Asphaltstraße mit Walzasphalt wird ebenfalls die in Abschnitt 2.6.1 beschriebene Bewertungslogik angewendet. Der Energiebedarf des Szenarios ist für die Betrachtungsjahre 2027, 2040 und 2050 differenziert nach Energieträgern in Tabelle 11 dargestellt.

*Tabelle 11: Energiebedarf des Szenarios der Deckensanierung einer Asphaltstraße mit Walzasphalt differenziert nach Betrachtungsjahr und Energieträger*

**Deckensanierung einer Asphaltstraße mit Walzasphalt**

| *Die Energiebedarfe sind in kWh/Arbeitstag (8 Stunden) angegeben.* | 2027 | | | 2040 | | | 2050 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Diesel/ HVO | Strom | Wasser-stoff | Diesel/ HVO | Strom | Wasser-stoff | Diesel/ HVO | Strom | Wasser-stoff |
| **Verkehrssicherung MÜF** | - | 573 | - | - | 503 | - | - | 456 | - |
| **Öffnung der MÜF** | - | 286 | - | - | 252 | - | - | 228 | - |
| **Aufbau der Verkehrssicherung 4+0** | - | 1.068 | - | - | 939 | - | - | 850 | - |
| **Baustelleneinrichtung / Anlieferung der Maschinen** | - | 818 | - | - | 719 | - | - | 650 | - |
| **Asphaltdeckschicht fräsen** | 729 | 3.157 | - | - | 2.900 | 1.249 | - | 2.625 | 1.103 |
| **Binderschicht fräsen** | 729 | 3.157 | - | - | 2.900 | 1.249 | - | 2.625 | 1.103 |
| **Binderschicht herstellen** | 566 | 6.394 | - | - | 5.865 | 670 | - | 5.309 | 586 |
| **Asphaltdeckschicht (Walzasphalt) herstellen** | 566 | 6.394 | - | - | 5.865 | 670 | - | 5.309 | 586 |
| **Randabdichtung herstellen** | 238 | 454 | - | - | 399 | 399 | - | 361 | 299 |
| **Fugenarbeiten** | 238 | 454 | - | - | 399 | 399 | - | 361 | 299 |
| **Endmarkierung** | - | 454 | - | - | 399 | - | - | 361 | - |
| **Rückbau Verkehrssicherung 4+0** | - | 1.068 | - | - | 939 | - | - | 850 | - |
| **Verkehrssicherung MÜF** | - | 573 | - | - | 503 | - | - | 456 | - |
| **Schließen der MÜF** | - | 286 | - | - | 252 | - | - | 228 | - |
| **Abbau der Verkehrssicherung** | - | 573 | - | - | 503 | - | - | 456 | - |

MÜF: Mittelstreifenüberfahrt

Der maximale tägliche Energiebedarf sowie dessen Zuordnung zu den Versorgungsbereichen sind in Abbildung 43 und Abbildung 44 dargestellt. Der Verlauf des Speicherzustands im Baufeld ist Abbildung 45 zu entnehmen.

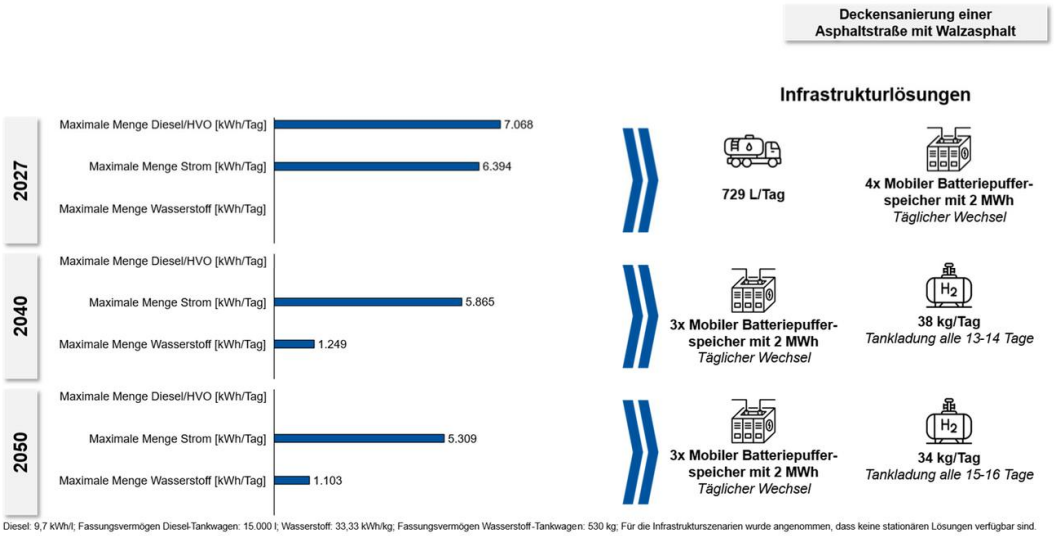



*Abbildung 43: Erforderliche Energieversorgung auf Grundlage des maximalen täglichen Energiebedarfs für die Deckensanierung einer Asphaltstraße mit Walzasphalt.*

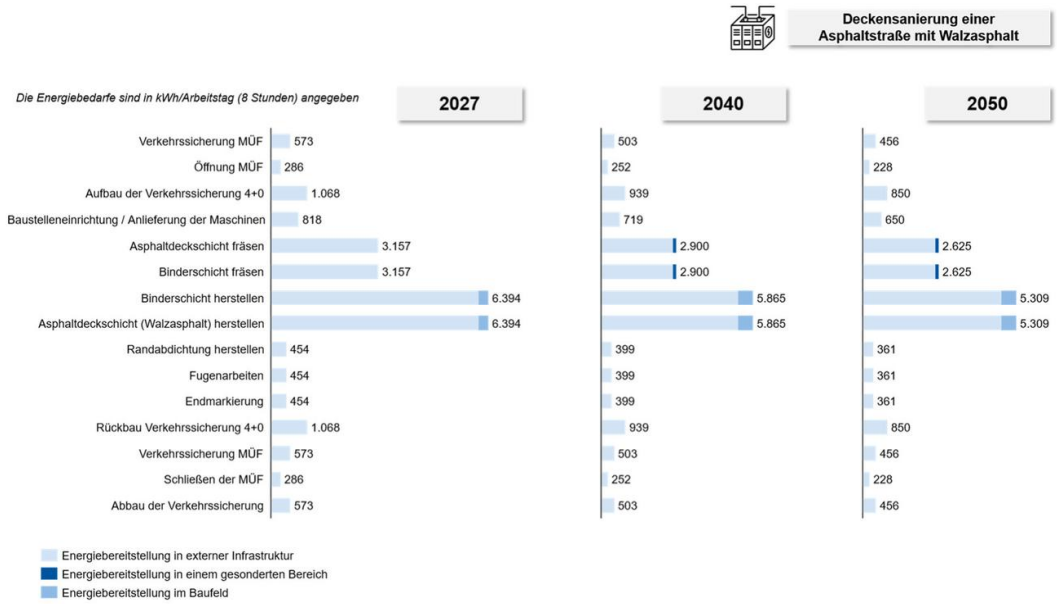



*Abbildung 44: Zuordnung der Energiebedarfe für die Jahre 2027, 2040 und 2050 nach Versorgungsbereich für die Deckensanierung einer Asphaltstraße mit Walzasphalt.*

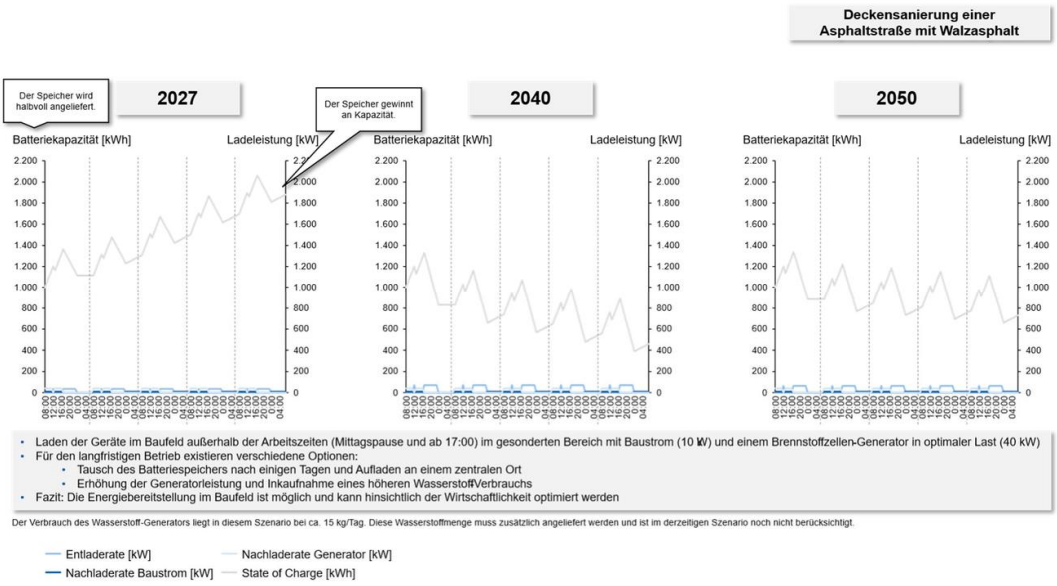



*Abbildung 45: Speicherzustände der Batteriespeicher im Tagesverlauf für die Betrachtungsjahre 2027, 2040 und 2050 für die Deckensanierung einer Asphaltstraße mit Walzasphalt.*

Die dargestellten Speicherzustände zeigen, dass die Energiebereitstellung im Baufeld auch für die Deckensanierung grundsätzlich möglich ist. Im

Unterschied zur grundhaften Sanierung ist der Energiebedarf der Deckensanierung geringer. Dadurch reicht die angesetzte Energielösung im betrachteten Szenario aus, um den Batteriespeicher nicht nur zu stützen, sondern ihn über den Betrachtungs-zeitraum hinweg wieder nachzuladen bzw. auf einem ausreichenden Ladezustand zu halten. Dies verdeutlicht, dass die Energiebereitstellung bei der Deckensanierung unter den gewählten Randbedingungen günstiger ausfällt als bei der grundhaften Sanierung. Aufgrund einer zunehmenden Anzahl an elektrifizierten Fahrzeugen im Baustelleneinsatz wird dieser Effekt ab dem Betrachtungszeitraum 2040 kompensiert. Dennoch können auch für spätere Betrachtungszeiträume die notwendigen Ladeleistungen bereitgestellt werden.

### 2.6.5 Beispiel: Deckensanierung einer Asphaltstraße mit Gussasphalt

Für die Deckensanierung einer Asphaltstraße mit Gussasphalt wird ebenfalls die in Abschnitt 2.6.1 beschriebene Bewertungslogik angewendet. Der Energiebedarf des Szenarios ist für die Betrachtungsjahre 2027, 2040 und 2050 differenziert nach Energieträgern in Tabelle 12 dargestellt.

*Tabelle 12: Energiebedarf des Szenarios der Deckensanierung einer Asphaltstraße mit Gussasphalt differenziert nach Betrachtungsjahr und Energieträger*

**Deckensanierung einer Asphaltstraße mit Gussasphalt**

| *Die Energiebedarfe sind in kWh/Arbeitstag (8 Stunden) angegeben.* | 2027 | | | 2040 | | | 2050 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Diesel/ HVO | Strom | Wasser-stoff | Diesel/ HVO | Strom | Wasser-stoff | Diesel/ HVO | Strom | Wasser-stoff |
| **Verkehrssicherung MÜF** | - | 573 | - | - | 503 | - | - | 456 | - |
| **Öffnung der MÜF** | - | 286 | - | - | 252 | - | - | 228 | - |
| **Aufbau der Verkehrssicherung 4+0** | - | 1.068 | - | - | 939 | - | - | 850 | - |
| **Baustelleneinrichtung / Anlieferung der Maschinen** | - | 818 | - | - | 719 | - | - | 650 | - |
| **Asphaltdeckschicht fräsen** | 729 | 3.157 | - | - | 2.900 | 1.249 | - | 2.625 | 1.103 |
| **Binderschicht fräsen** | 729 | 3.157 | - | - | 2.900 | 1.249 | - | 2.625 | 1.103 |
| **Binderschicht herstellen** | 566 | 6.394 | - | - | 5.865 | 670 | - | 5.309 | 586 |
| **Asphaltdeckschicht (Gussasphalt) herstellen** | 793 | 153 | - | - | 846 | 350 | - | 766 | 303 |
| **Randabdichtung herstellen** | 238 | 454 | - | - | 399 | 339 | - | 361 | 299 |
| **Fugenarbeiten** | 238 | 454 | - | - | 399 | 339 | - | 361 | 299 |
| **Endmarkierung** | - | 454 | - | - | 399 | - | - | 361 | - |
| **Rückbau Verkehrssicherung 4+0** | - | 1.068 | - | - | 939 | - | - | 850 | - |
| **Verkehrssicherung MÜF** | - | 573 | - | - | 503 | - | - | 456 | - |
| **Schließen der MÜF** | - | 286 | - | - | 252 | - | - | 228 | - |
| **Abbau der Verkehrssicherung** | - | 573 | - | - | 503 | - | - | 456 | - |

MÜF: Mittelstreifenüberfahrt

Der maximale tägliche Energiebedarf sowie dessen Zuordnung zu den Versorgungsbereichen sind in Abbildung 46 und Abbildung 47 dargestellt. Der Verlauf des Speicherzustands im Baufeld ist Abbildung 48 zu entnehmen.

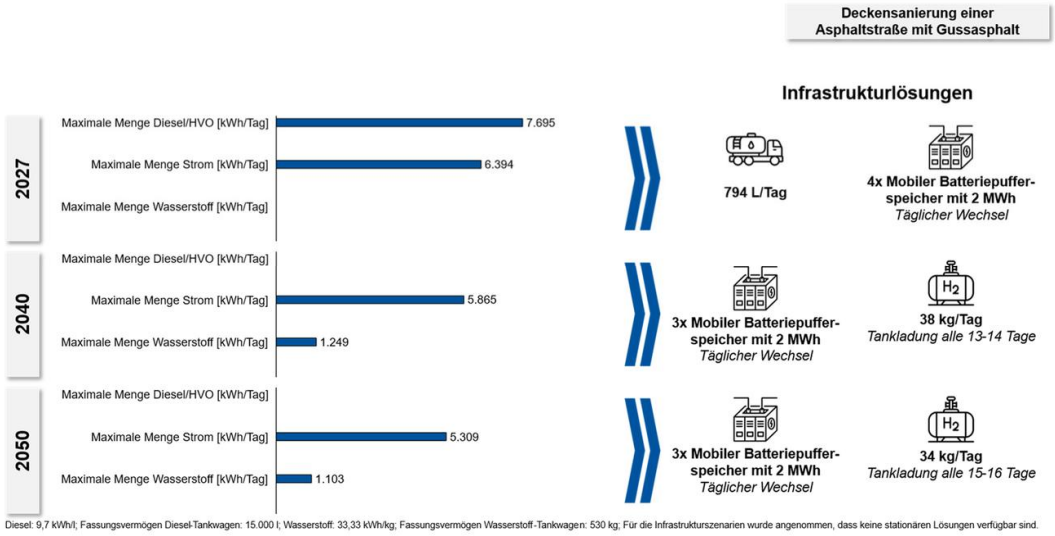



*Abbildung 46: Erforderliche Energieversorgung auf Grundlage des maximalen täglichen Energiebedarfs für die Deckensanierung einer Asphaltstraße mit Gussasphalt.*

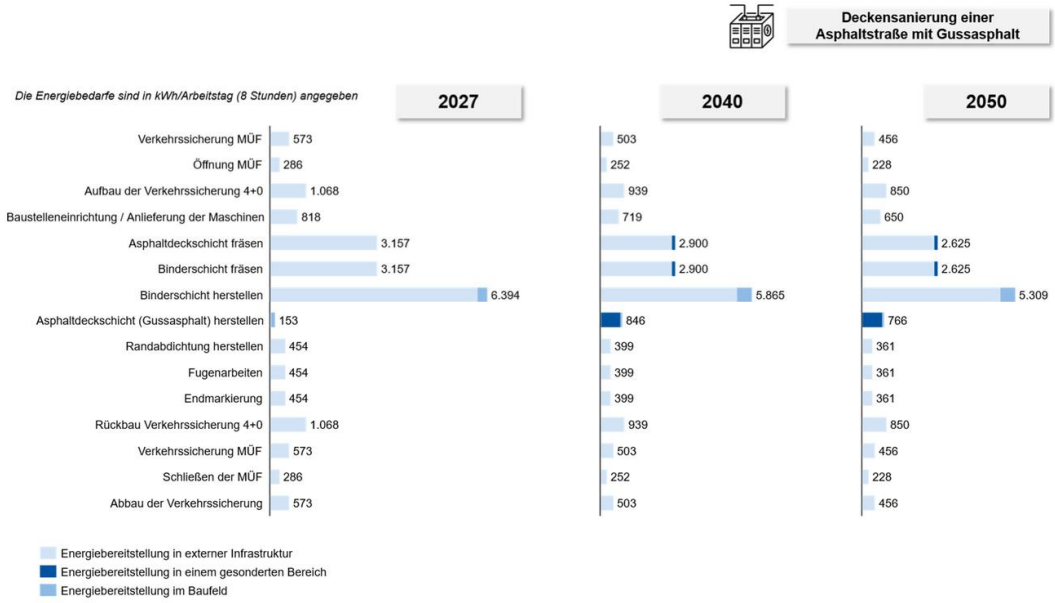



*Abbildung 47: Zuordnung der Energiebedarfe für die Jahre 2027, 2040 und 2050 nach Versorgungsbereich für die Deckensanierung einer Asphaltstraße mit Gussasphalt.*

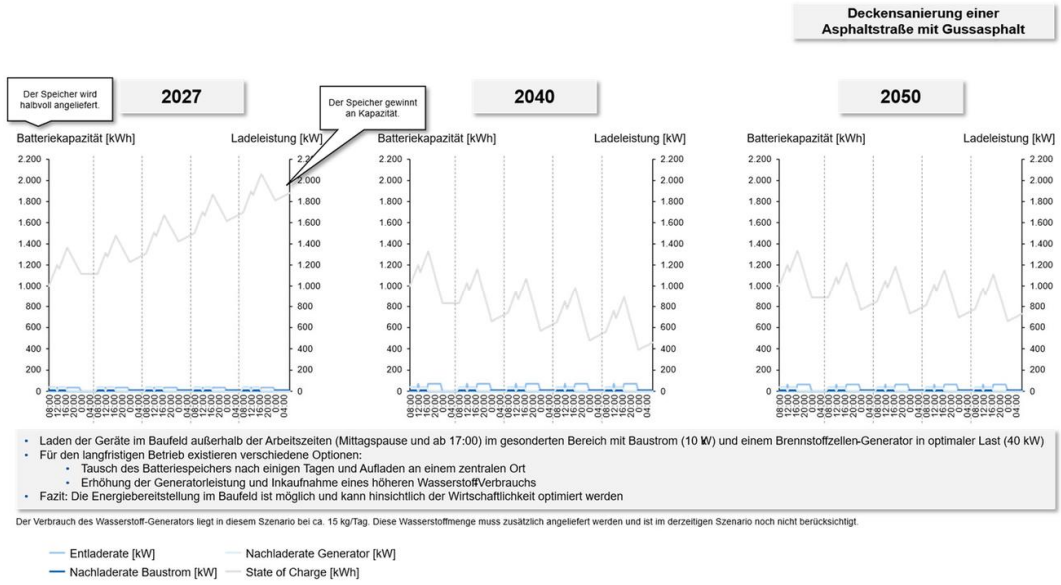



*Abbildung 48: Speicherzustände der Batteriespeicher im Tagesverlauf für die Betrachtungsjahre 2027, 2040 und 2050 für die Deckensanierung einer Asphaltstraße mit Gussasphalt.*

Auch für die Deckensanierung mit Gussasphalt erweist sich die angesetzte Energielösung als ausreichend. Wie bereits bei der Deckensanierung mit Walzasphalt kann der Ladezustand des Batteriespeichers aufgrund des vergleichsweise geringeren Energiebedarfs über den Betrachtungszeitraum weitgehend stabil gehalten beziehungsweise wieder erhöht werden.

### 2.6.6 Ergebnisse

Im Rahmen der Ergebnisbewertung wird untersucht, welchen Einfluss eine zunehmende Elektrifizierung der eingesetzten Maschinen und Fahrzeuge auf die Betriebskosten sowie die Treibhausgasemissionen unterschiedlicher Straßenbaumaßnahmen im Vergleich zur konventionellen Herstellung hat. Als Referenz dient die heutige konventionelle Ausführung, die für das Jahr 2025 abgebildet wird. Für die Betrachtungsjahre 2027, 2040 und 2050 wird jeweils unterstellt, dass alle Maschinen und Fahrzeuge, die zu diesem Zeitpunkt verfügbar bzw. gemäß der zugrunde gelegten Technologieentwicklung elektrifizierbar sind (siehe Abbildung 24 und Tabelle 5), auch tatsächlich eingesetzt werden. Die dargestellten Ergebnisse beschreiben damit ein optimiertes Umsetzungsszenario unter der Annahme einer konsequenten Nutzung elektrifizierter Gerätetechnik sowie einer geeigneten Energie- und Ladeinfrastruktur.

Bei der Bewertung der Kosten liegt der Fokus auf den Betriebskosten der eingesetzten Maschinen und Fahrzeuge. Die Anschaffungskosten elektrifizierter Baumaschinen werden in dieser Betrachtung nicht vertieft bewertet, da sie zum

heutigen Zeitpunkt noch stark von geringen Stückzahlen, einem jungen Markt, hohen Batterie- und Systemkosten sowie fehlenden Skaleneffekten geprägt sind. Es ist jedoch davon auszugehen, dass sich diese Kosten mit zunehmender Marktdurchdringung, technologischer Weiterentwicklung und höheren Produktionszahlen verändern werden. Die Betriebskosten ermöglichen demgegenüber eine bessere Einordnung der laufenden Kostenwirkungen im Baustellenbetrieb, insbesondere im Hinblick auf Energiebedarf, Energiepreise und Effizienz der eingesetzten Antriebstechnologien.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Betriebskosten bereits kurzfristig deutlich reduzieren lassen. Unter der Annahme, dass die verfügbaren elektrifizierten Maschinen konsequent eingesetzt werden, können sich die Betriebskosten bis 2027 gegenüber der konventionellen Herstellung etwas mehr als halbieren. In den weiteren Betrachtungsjahren verstärkt sich dieser Effekt durch eine zunehmende Elektrifizierung der Maschinenketten sowie durch technologische Effizienzsteigerungen. Bis zum Betrachtungsjahr 2050 können die Betriebskosten unter den getroffenen Annahmen auf bis zu etwa ein Achtel der heutigen Betriebskosten reduziert werden. Hierbei werden keine Auswirkungen durch eine Veränderung des Strompreises berücksichtigt. Der Strompreis wird konstant auf dem Niveau des durchschnittlichen Industriestrompreises in den D-A-CH-Ländern aus dem Jahr 2025 gehalten. Abbildung 49 stellt diese Entwicklung der Betriebskosten für die betrachteten Jahre gegenüber.

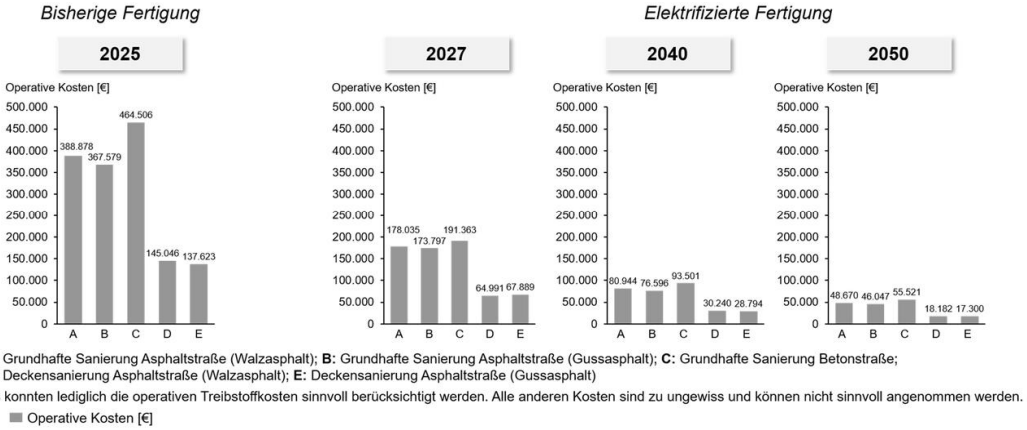



*Abbildung 49: Entwicklung der Betriebskosten im Vergleich zur konventionellen Herstellung.*

Neben den Betriebskosten zeigt auch die Betrachtung der Treibhausgasemissionen ein erhebliches Minderungspotenzial. Gegenüber dem konventionellen Referenzfall 2025 können die Emissionen bereits bis 2027 unter optimalen Randbedingungen um ca. 80 % reduziert werden. Mit zunehmender Elektrifizierung der eingesetzten Maschinen und Fahrzeuge sowie weiteren

Effizienzsteigerungen verbessert sich dieser Effekt in den Folgejahren weiter. Für das Betrachtungsjahr 2050 ergibt sich unter den getroffenen Annahmen eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um bis zu ca. 97 %. Abbildung 50 zeigt die Entwicklung der Treibhausgasemissionen für die betrachteten Jahre.

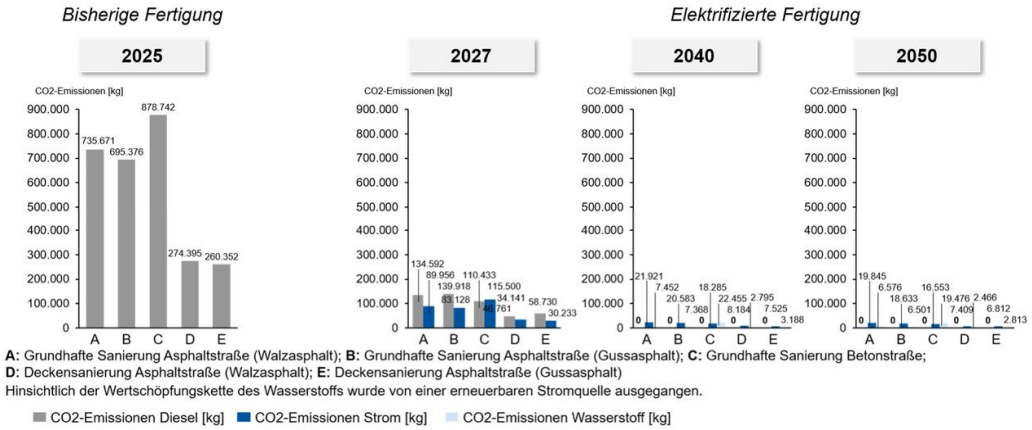



*Abbildung 50: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Vergleich zur konventionellen Herstellung.*

Insgesamt verdeutlichen die Ergebnisse, dass eine weitgehende Elektrifizierung der betrachteten Straßenbaumaßnahmen sowohl hinsichtlich der Betriebskosten als auch hinsichtlich der Treibhausgasemissionen erhebliche Potenziale bietet. Bereits kurzfristig können unter optimalen Randbedingungen deutliche Minderungen erreicht werden. Langfristig nehmen diese Potenziale weiter zu, sofern die erforderliche Maschinenverfügbarkeit, Energieversorgung, Ladeinfrastruktur und baustellenlogistische Einbindung sichergestellt werden können. Gleichzeitig ist zu berücksichtigen, dass die dargestellten Ergebnisse modellhafte Potenziale abbilden. Die tatsächliche Umsetzung hängt wesentlich von den projektspezifischen Randbedingungen, der Verfügbarkeit geeigneter Maschinen, den Energiepreisen, der Herkunft des eingesetzten Stroms sowie der Integration der Energieversorgung in den Bauablauf ab.

# 3 Ausschreibungen von Großprojekten (AP 3)

Im Arbeitspaket 3 wurde untersucht, wie nachhaltige Vergabekriterien so gestaltet werden können, dass sie die Elektrifizierung großer Bau- und Infrastrukturvorhaben wirksam fördern. Ausgangspunkt war die Annahme, dass öffentliche Vergaben ein zentraler Hebel sind, um Innovationen, emissionsärmere Lösungen und tragfähige Transformationspfade im Markt voranzubringen.

Ziel der Analyse war es, sowohl die rechtlich-verfahrensbezogenen Ansatzpunkte als auch die praktischen Anforderungen aus Sicht der Marktakteure zu analysieren und daraus konkrete Handlungsmöglichkeiten für die Vergabepraxis abzuleiten.

## 3.1 Methodisches Vorgehen

Im nächsten Schritt wurde der Status quo im deutschsprachigen Raum systematisch untersucht. Ziel war es, die Praxis in Deutschland, Österreich und der Schweiz zu erfassen, Gemeinsamkeiten und Unterschiede sichtbar zu machen und daraus belastbare Hinweise für geeignete Vergabekriterien abzuleiten. Das methodische Vorgehen umfasste drei aufeinander aufbauende Schritte:

1. **Status-quo-Analyse:** Literatur- und Ausschreibungsrecherche sowie Experteninterviews mit zentralen Akteuren der öffentlichen Infrastrukturvergabe, darunter Autobahn GmbH, ASFINAG und ASTRA.

2. **Entwicklung konkreter Kriterien:** Ableitung praktisch nutzbarer Zuschlagskriterien, Bewertungsansätze und vertraglicher Steuerungsinstrumente.

3. **Erste Validierung:** Rückkopplung mit Experten sowie Industrie- und Praxisakteuren zur Prüfung von Praktikabilität, Verständlichkeit und Umsetzbarkeit.

Ein übergreifendes Ziel war der Vergleich innerhalb des D-A-CH-Raums. Im Mittelpunkt standen Best Practices, strukturelle Unterschiede und übertragbare Modelle. Dadurch entstand nicht nur eine Bestandsaufnahme, sondern auch eine belastbare Grundlage für die Bewertung, welche Instrumente sich für eine breitere Anwendung eignen.

## 3.2 Analyse des Status Quo der Vergabemechanismen (AP 3.1)

Dieser Abschnitt fasst die zentralen Erkenntnisse aus den Bereichen Vergabemechanismen, Vertragsmechanismen sowie der internationalen Einordnung im D-A-CH-Raum und erweiterten europäischen Vergleich zusammen. Ziel ist eine strukturierte und managementtaugliche Darstellung der aktuell verwendeten Instrumente sowie deren Reifegrad.

### 3.2.1 Einordnung der Vergabeverfahren

Untersucht wurde zunächst, in welchen Vergabeverfahren oberhalb der EU-Schwellenwerte nachhaltige Anforderungen grundsätzlich verankert werden können. Betrachtet wurden unter anderem das offene Verfahren, das nichtoffene Verfahren, der wettbewerbliche Dialog, das Verhandlungsverfahren und die Innovationspartnerschaft. Für die Vertiefung stand vor allem das offene Verfahren im Fokus, da dieses bei Straßenbau- und Sanierungsmaßnahmen in der Praxis den Regelfall darstellt. Andere Vergabeverfahren kommen in diesem Bereich demgegenüber nur in untergeordnetem Umfang zur Anwendung. Aufgrund seiner hohen praktischen Relevanz bildet das offene Verfahren daher die maßgebliche Grundlage für die weitere Untersuchung und die Übertragbarkeit der Ergebnisse.

Die Analyse zeigt, dass nachhaltige Vergabekriterien nicht nur punktuell über einzelne Zuschlagsmerkmale eingebracht werden sollten. Besonders wirksam sind sie, wenn sie auf zwei Ebenen systematisch verankert werden:

- **Vergabephase:** Integration über Mindestanforderungen, Eignungskriterien, technische Spezifikationen oder Zuschlagskriterien neben dem Preis.

- **Vertragsphase:** Absicherung der Umsetzung durch vertragliche Mechanismen wie Vertragsstrafen sowie Bonus-Malus-Regelungen.

In der Vergabephase geht es darum, das wirtschaftlichste und zugleich nachhaltigste Angebot auszuwählen. Anforderungen an Elektrifizierung und Emissionsminderung können hier über Mindestanforderungen, Eignungskriterien, technische Spezifikationen oder Zuschlagskriterien abgebildet werden. Besonders wichtig sind Punktesysteme, Bewertungsmatrizen und Benchmarks, weil sie Elektrifizierung als konkreten und nachvollziehbar bewertbaren Bestandteil der Angebotsqualität erfassbar machen.

Ebenso wichtig ist die Vertragsphase. Anspruchsvolle Kriterien entfalten nur dann Wirkung, wenn ihre Umsetzung im Projektverlauf auch verlässlich abgesichert wird. Hier spielen vertragliche Mechanismen eine zentrale Rolle,

insbesondere Vertragsstrafen und Bonus-Malus-Regelungen. So wird Elektrifizierung nicht nur im Wettbewerb bewertet, sondern auch als steuerungsrelevantes Umsetzungsziel in der Projektdurchführung verankert.

Einen Überblick über die untersuchten Verfahrensarten gibt Abbildung 51. Das offene Verfahren stellt als öffentliches Verfahren ohne vorgeschalteten Teilnahmewettbewerb den Regelfall bei der Vergabe von Bauleistungen dar. Nach Veröffentlichung der Vergabeunterlagen können alle interessierten Unternehmen ein Angebot abgeben, das anschließend zunächst auf formale und fachliche Zulässigkeit geprüft und danach anhand der festgelegten Zuschlagskriterien gewertet wird. Beim nichtoffenen Verfahren wird der Bieterkreis dagegen über einen vorgelagerten Teilnahmewettbewerb begrenzt, sodass nur ausgewählte Unternehmen zur Angebotsabgabe aufgefordert werden. Das Verhandlungsverfahren erlaubt es dem Auftraggeber, mit den Bietern über Angebote und Lösungsansätze zu verhandeln, während der wettbewerbliche Dialog auf die gemeinsame Entwicklung geeigneter Lösungen mit den Bietern ausgerichtet ist und sich insbesondere für komplexe Vorhaben eignet, deren Anforderungen zu Beginn noch nicht abschließend beschrieben werden können. Die Innovationspartnerschaft zielt schließlich auf die Entwicklung und den anschließenden Erwerb innovativer, am Markt noch nicht verfügbarer Leistungen ab.

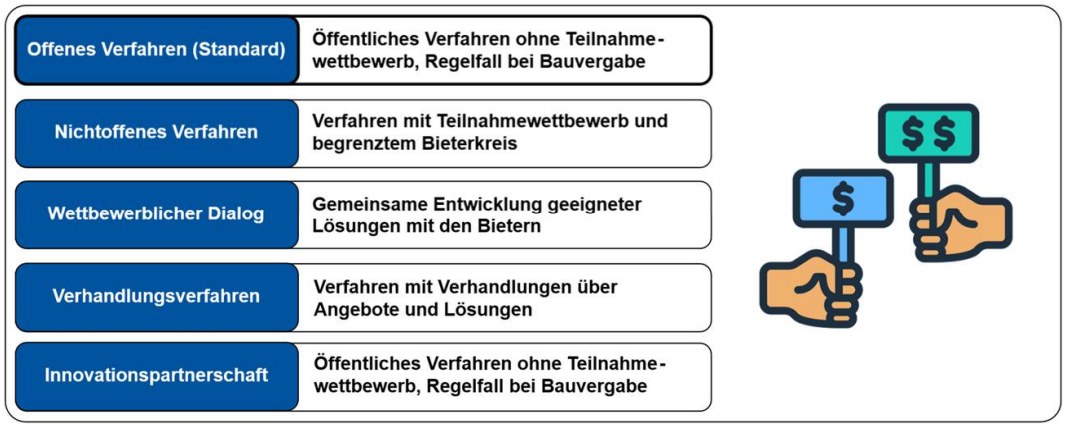



*Abbildung 51: Arten der Vergabeverfahren*

Die Verfahrensarten unterscheiden sich damit deutlich in ihren Spielräumen für die Verankerung nachhaltiger Anforderungen: Während Verhandlungsverfahren, wettbewerblicher Dialog und Innovationspartnerschaft grundsätzlich mehr Raum für die gemeinsame Entwicklung elektrifizierungsorientierter Lösungen bieten, kommt dem offenen Verfahren aufgrund seiner hohen praktischen Verbreitung die größte Hebelwirkung zu.

### 3.2.2 Vergabemechanismen im D-A-CH-Vergleich

Um den Status quo der Vergabepraxis im deutschsprachigen Raum zu erfassen, wurden die drei zentralen Vergabestellen für den hochrangigen Straßenbau, die Autobahn GmbH (Deutschland), die ASFINAG (Österreich) und das ASTRA (Schweiz), vergleichend betrachtet. Grundlage bilden die im Rahmen des Projekts geführten Experteninterviews sowie die begleitende Literatur- und Ausschreibungsrecherche.

In Deutschland stehen der Autobahn GmbH mit Eignungskriterien, technischen Spezifikationen und Zuschlagskriterien grundsätzlich verschiedene Instrumente zur Berücksichtigung von Nachhaltigkeitsaspekten zur Verfügung. Deren Anwendung erfolgt bislang jedoch überwiegend projektspezifisch und nicht flächendeckend standardisiert. $CO_2$-Bewertungen werden insbesondere in Pilotprojekten erprobt und dabei auch in Zuschlagslogiken integriert. Nach Angaben aus den Experteninterviews wurde hierbei unter anderem eine Bepreisung von rund 85 €/t $CO_2$ angesetzt; in weiterentwickelten Pilotansätzen werden die $CO_2$-Mengen teilweise auch in der Vertragsabwicklung berücksichtigt.

Österreich verfolgt mit der ASFINAG einen vergleichsweise weit entwickelten und standardisierten Ansatz. Nachhaltigkeitskriterien sind in die Bestbieterlogik integriert und werden über definierte Bewertungsmatrizen, Referenzwerte und Nachweissysteme in der Angebotswertung berücksichtigt. Ein fester $CO_2$-Preis je Tonne wird dabei nicht angesetzt; stattdessen fließen beispielsweise ökobilanzielle Kriterien für Asphalt unmittelbar in die Zuschlagsentscheidung ein. Ergänzend kommen Instrumente wie Pönalen, Monitoring und Digitalisierungskriterien zum Einsatz.

Die Schweiz nutzt mit dem ASTRA die bestehenden Spielräume innerhalb des offenen Vergabeverfahrens insbesondere über die Ausgestaltung von Zuschlagskriterien. Im Fokus stehen dabei Pilotprojekte zur $CO_2$-Gesamtbewertung sowie die Weiterentwicklung entsprechender Bewertungsmodelle und Punktesysteme. Hierzu sind Pilot-Ausschreibungen mit modifizierten Zuschlagskriterien vorgesehen. Gleichzeitig bestehen regulatorische Rahmenbedingungen, die den Spielraum für innovative Vergabeansätze teilweise begrenzen.

Über die Länderunterschiede hinweg wird gleichzeitig deutlich, dass Vergabeverfahren weiterhin häufig preisgetrieben sind. Auch dort, wo Nachhaltigkeitskriterien grundsätzlich verfügbar sind, dominiert in der Praxis der Angebotspreis die Zuschlagsentscheidung. Darüber hinaus sind Nachhaltigkeitskriterien teilweise komplex und schwer vergleichbar ausgestaltet, was für Bieter die Kalkulation erschwert und für Vergabestellen die Vergleichbarkeit der Angebote reduziert. Schließlich besteht insbesondere bei kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) die Gefahr, dass steigende Anforderungen

Markteintrittsbarrieren erhöhen und deren gleichberechtigte Teilnahme am Wettbewerb erschweren.

### 3.2.3 Erweiterter europäischer Vergleich

Über den D-A-CH-Raum hinaus wurde die Vergabepraxis ausgewählter europäischer Länder betrachtet, die bei der $CO_2$-orientierten Ausgestaltung von Ausschreibungen als Vorreiter gelten. Anhand bereits erfolgter Vergaben zur $CO_2$-Reduktion wurde untersucht, welche Mindestanforderungen, Zuschlagskriterien und Vertragsmechanismen in den jeweiligen Ländern zum Einsatz kommen.

Norwegen nutzt die Monetarisierung von $CO_2$-Emissionen als Instrument der Angebotsbewertung im Straßenbau. Die norwegische Straßenverwaltung (Statens vegvesen) setzte bei Asphaltvergaben zunächst 5 NOK/kg $CO_2$ an, entsprechend 5.000 NOK/t $CO_2$ bzw. größenordnungsmäßig rund 500 €/t $CO_2$. Der Ansatz wurde später auf 7,5 NOK/kg $CO_2$ erhöht. Dadurch werden emissionsärmere Angebote wirtschaftlich begünstigt. Dadurch werden emissionsärmere Angebote wirtschaftlich begünstigt und Anreize für den Einsatz emissionsärmerer Technologien geschaffen. [69]

Dänemark setzt Lebenszyklusanalysen zur Bewertung der Klima- und Umweltwirkungen von Infrastrukturprojekten ein. Mit InfraLCA steht hierfür ein standardisiertes, gemeinsam von der dänische Straßendirektion (Vejdirektoratet) und der staatliche dänische Eisenbahninfrastrukturbehörde (Banedanmark) entwickeltes Bewertungsinstrument zur Verfügung. [70] Darüber hinaus werden $CO_2$-Emissionen bei ausgewählten Asphaltvergaben monetarisiert. Die dänische Straßendirektion setzte hierfür einen Schattenpreis von 1.500 DKK/t $CO_2$, entsprechend rund 200 €/t $CO_2$, an. [71]

Schweden setzt bei der Vergabe von Bau- und Infrastrukturleistungen unterschiedliche Instrumente zur Förderung emissionsfreier bzw. elektrifizierter Baustellen ein. Hierzu zählen verbindliche Anforderungen an elektrische Arbeitsmaschinen und Fahrzeuge, Bonus- und Anreizmodelle sowie fiktive Preisabschläge im Rahmen der Angebotswertung. Praxisbeispiele aus Stockholm und Uppsala zeigen, dass diese Instrumente auch kombiniert und durch Nachweis- und Kontrollpflichten ergänzt werden. [72]

In den Niederlanden werden Umwelt- und $CO_2$-Aspekte bei Straßenbauvergaben in die Angebotswertung einbezogen. Die niederländische Infrastruktur- und Wasserbaubehörde (Rijkswaterstaat) nutzt hierfür unter anderem die $CO_2$-Prestatieladder, ein standardisiertes $CO_2$-Management- und Vergabeinstrument. Bieter können ein bestimmtes $CO_2$-Ambitionsniveau zusagen und abhängig davon einen fiktiven Preisvorteil in der Angebotswertung erhalten. Auf diese

Weise werden Angebote mit ambitionierteren $CO_2$-Reduktionszielen bei der Zuschlagsentscheidung begünstigt. [73]

Ein aktuelles internationales Praxisbeispiel stellt das britische Lower Thames Crossing dar. Das seit Anfang 2026 in Umsetzung befindliche Großprojekt soll nach Angaben der britischen Straßenbaubehörde National Highways als erstes großes britisches Infrastrukturprojekt in der Bauphase $CO_2$-neutral realisiert werden. Hierzu wurden $CO_2$-Ziele bereits in die Beschaffung und Vertragsgestaltung integriert und durch ein Construction Carbon Limit konkretisiert. [90] Bei den Hauptbauleistungen werden neben dem Preis qualitative Kriterien berücksichtigt. Beim Straßenbauvertrag „Kent Roads“ erfolgte die Gewichtung beispielsweise mit 30 % Preis und 70 % Qualität. [91] Ergänzend wird mit der Wasserstoffversorgung auch ein Teil der baustellenseitigen Energieversorgung als eigenständige Leistung beschafft. [92] Das Projekt zeigt damit, wie $CO_2$-Minderung, Vergabe und Energieversorgung bei einem großräumigen Straßeninfrastrukturprojekt gemeinsam operationalisiert werden können. Gleichzeitig verdeutlicht es, dass entsprechende Ansätze inzwischen auch bei sehr großen Infrastrukturvorhaben praktisch erprobt und schrittweise in die Umsetzung überführt werden.

Insgesamt zeigt sich ein heterogenes Bild. Deutschland agiert weiterhin überwiegend projektbasiert und ohne flächendeckend standardisierte Bewertungsansätze, während Österreich, skandinavische Länder und die Niederlande Nachhaltigkeitskriterien bereits deutlich systematischer in Vergabe und Bewertung integrieren. Die Schweiz befindet sich zwischen diesen Ansätzen und entwickelt ihre Bewertungsmodelle schrittweise weiter. Mit dem Lower Thames Crossing liegt in Großbritannien zugleich ein erstes großmaßstäbliches Praxisbeispiel für die Umsetzung entsprechender Ansätze vor. Im Hinblick auf Großbaustellen im Straßenbau lässt sich jedoch festhalten, dass für großräumige und netzferne Autobahnbaustellen bislang weder flächendeckend etablierte Lösungen zur Elektrifizierung und Energieversorgung noch standardisierte Vergabemodelle für deren regelmäßige Anwendung vorliegen. Entsprechende Ansätze finden sich derzeit überwiegend in Form einzelner Projekte.

### 3.2.4 Ergebnisse der Experteninterviews

Die Interviews mit Bauunternehmen und Baumaschinenherstellern zeigen ein klares Bild: Die zentrale Herausforderung liegt weniger in fehlenden Technologien als in der unzureichenden vergabeseitigen Berücksichtigung bereits verfügbarer Lösungen.

Als Hauptproblem wurde beschrieben, dass Ausschreibungen weiterhin stark preisgetrieben sind. Nachhaltigkeitsaspekte, insbesondere $CO_2$-bezogene Kriterien, werden häufig nur gering gewichtet. Eine beispielhafte Gewichtung von rund fünf Prozent reicht aus Sicht der Interviewpartner nicht aus, um echte

Investitionsanreize für elektrifizierte oder emissionsärmere Lösungen zu schaffen. Gleichzeitig entstehen durch neue Technologien oft Mehrkosten, etwa für Anschaffung, Betriebskonzepte oder begleitende Infrastruktur. Werden diese Aufwände in der Vergabe nicht angemessen berücksichtigt, bleiben marktreife Lösungen wirtschaftlich benachteiligt.

Im Benchmarking wurde zudem deutlich, dass in der D-A-CH-Region oft die klaren und wirksamen Anreizstrukturen fehlen, die in anderen Ländern bereits bestehen. Als positive Beispiele wurden insbesondere die Niederlande und die nordischen Länder genannt. Dort fördern eindeutige Vorgaben, verlässliche Rahmenbedingungen und teilweise auch Förder- oder Co-Finanzierungsansätze den Markthochlauf nachhaltiger Technologien. Das zeigt: Die Förderung der Elektrifizierung ist nicht nur eine technische oder wirtschaftliche Frage, sondern hängt wesentlich von Regelungsstabilität und klaren Marktsignalen ab.

Aus Sicht der Praxis sollten Vergabekriterien vor allem folgende Eigenschaften erfüllen:

- einfach und verständlich
- technologieoffen
- mit klaren $CO_2$-Zielen und transparenten Gewichtungen
- mit verlässlichen Rahmenbedingungen und eindeutigen Ausschreibungskriterien
- administrativ handhabbar und möglichst standardisiert

## 3.3 Definition nachhaltiger Vergabekriterien (AP 3.2, 3.3)

### 3.3.1 Ableitung möglicher Vergabekriterien

Im Rahmen der Untersuchung nachhaltiger Vergabekriterien wird der Elektrifizierungsindex (EI) als potenzielles Instrument zur Bewertung des Elektrifizierungsgrads von Bau- und Logistikprozessen betrachtet. Die vorliegende Darstellung zeigt, dass ein solcher Index nicht als einheitlich definierte Kennzahl zu verstehen ist, sondern vielmehr als methodischer Ansatz mit unterschiedlichen Operationalisierungsmöglichkeiten.

Die konkrete Ausgestaltung hängt dabei maßgeblich davon ab, welcher Gegenstandsbereich betrachtet wird, welche Daten verfügbar sind und welche Steuerungswirkung im Rahmen der Vergabe erzielt werden soll. In Abbildung 52 ist eine Übersicht der erarbeiteten Vergabekriterien zu sehen.

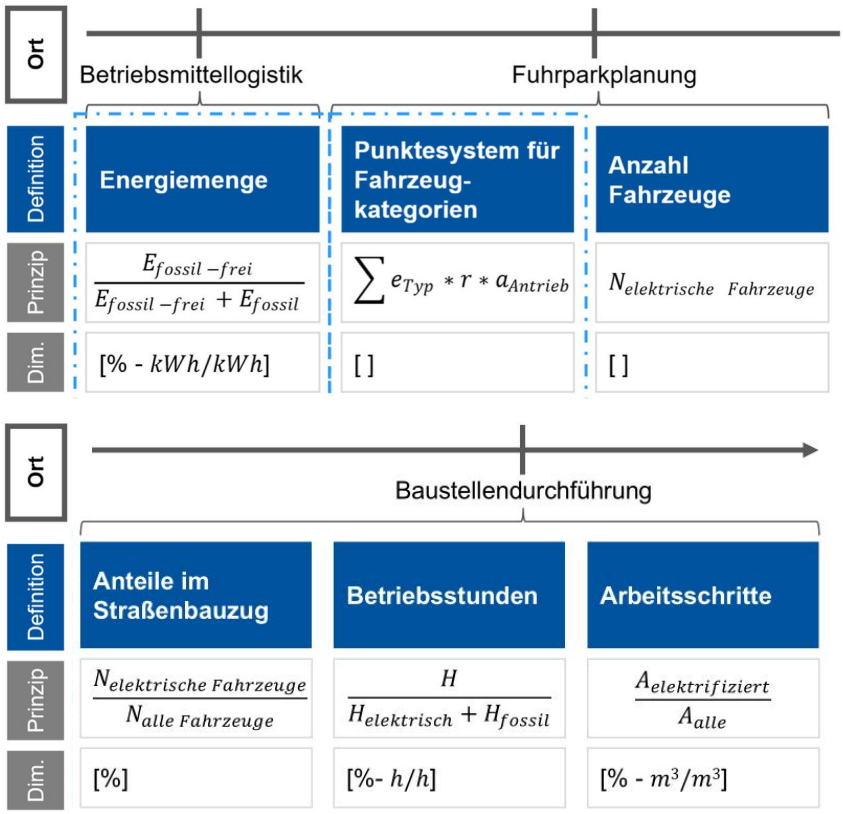


*Abbildung 52: Übersicht Vergabekriterien*

Die dargestellten Ansätze lassen sich drei übergeordneten Anwendungsfeldern zuordnen:

- Betriebsmittellogistik,
- Fuhrparkplanung
- und Baustellendurchführung.

Innerhalb dieser Bereiche werden verschiedene Definitionen des Elektrifizierungsindex aufgezeigt, die sich hinsichtlich ihrer Datengrundlage, ihrer Aussagekraft und ihrer praktischen Handhabbarkeit unterscheiden.

Daraus ergibt sich, dass der Elektrifizierungsindex nicht als starres Messinstrument, sondern als anwendungsbezogener Bewertungsrahmen einzuordnen ist.

### 3.3.2 Vergabe mittels Betriebsmittellogistik

Ein erster Ansatz im Bereich der Betriebsmittellogistik definiert den Elektrifizierungsindex als Verhältnis der fossilfreien Energiemenge zur gesamten eingesetzten Energiemenge, also zur Summe aus fossilfreier und fossiler Energie. Dieser Zugang ist insofern besonders relevant, als er unmittelbar am realen Energieeinsatz ansetzt und damit eine physikalisch belastbare Grundlage für die Bewertung des Elektrifizierungsgrads bietet.

Die dafür erforderlichen Daten können entweder fahrzeugbezogen aus dem tatsächlichen Energieverbrauch oder über Bordcomputer und vergleichbare Datenschnittstellen ermittelt werden. Der Vorteil dieses Ansatzes liegt in seiner hohen inhaltlichen Nähe zur tatsächlichen Energienutzung.

Elektrifizierung wird hier nicht indirekt über Fahrzeugzahlen oder Kategorien abgebildet, sondern unmittelbar über den energetischen Beitrag fossilfreier Systeme. Für eine belastbare Anwendung ist allerdings eine hinreichend präzise Datenerfassung erforderlich.

### 3.3.3 Ansätze im Bereich der Fuhrparkplanung

#### Punktesystem auf Basis von Fahrzeugkategorien

Als weiterer Ansatz wird ein klassifikationsbasiertes Punktesystem dargestellt, in dem Fahrzeuge je nach Antrieb, Kraftstoffversorgung und Fahrzeuggröße bewertet werden. Dieser Zugang ist stärker abstrahierend angelegt und zielt darauf ab, eine vereinfachte, standardisierte Einordnung von Fahrzeugen vorzunehmen, ohne zwingend auf detaillierte Betriebs- oder Telematikdaten angewiesen zu sein.

Eine solche Systematik kann an Größen wie Energieverbrauch oder $CO_2$-Äquivalenten orientiert werden. Daraus ergibt sich ein methodisch pragmatischer Ansatz, der insbesondere für Ausschreibungssituationen von Interesse sein kann, in denen einfache Nachweis- und Bewertungslogiken erforderlich sind. Zugleich ist zu berücksichtigen, dass eine solche Klassifizierung den tatsächlichen Einsatz im Projekt nur indirekt abbildet und daher in ihrer Aussagekraft begrenzt sein kann.

#### Absolute Zahl elektrischer Fahrzeuge

Im Bereich der Fuhrparkplanung wird zunächst ein Ansatz beschrieben, bei dem eine absolute Mindestanzahl elektrischer Fahrzeuge vorgegeben oder als Bewertungsgröße herangezogen wird. Dieser Zugang ist besonders leicht

anwendbar, da die Erhebung vergleichsweise einfach erfolgen kann. Für Vergabeverfahren kann dies zunächst attraktiv erscheinen, weil die Nachweisführung mit geringem administrativem Aufwand verbunden ist.

Gleichzeitig ist auf eine wesentliche methodische Einschränkung hinzuweisen: Eine reine Zählgröße führt potenziell zu einer Übergewichtung kleiner Fahrzeuge gegenüber größeren, energetisch oder betrieblich relevanteren Maschinen. Der Ansatz ist damit zwar einfach operationalisierbar, bildet jedoch die tatsächliche Bedeutung einzelner Fahrzeuge für den Gesamtprozess nur unzureichend ab.

**Anteil elektrischer Fahrzeuge am Gesamtfuhrpark**

Ein daran anschließender Ansatz betrachtet den Anteil elektrischer Fahrzeuge an allen eingesetzten Fahrzeugen. Gegenüber der bloßen absoluten Anzahl stellt dies bereits eine relationale Größe dar, die den Elektrifizierungsgrad eines Fuhrparks in prozentualer Form ausdrückt. Auch dieser Ansatz ist vergleichsweise leicht zu erheben und kann daher in standardisierten Bewertungsverfahren genutzt werden.

Allerdings bleibt auch hier die Aussagekraft begrenzt, da weder die Einsatzintensität noch die energetische Relevanz einzelner Fahrzeuge berücksichtigt werden. Der Index bildet in diesem Fall primär die Zusammensetzung des Fuhrparks ab, erlaubt jedoch nur eingeschränkt Rückschlüsse auf die tatsächlichen Auswirkungen im Baustellenbetrieb.

### 3.3.4 Ansätze im Bereich der Baustellendurchführung

**Projektbezogene Betrachtung des Straßenbauzugs**

Ergänzend wird ein Ansatz vorgestellt, der sich auf den Anteil elektrifizierter Fahrzeuge innerhalb eines projektbezogen definierten Straßenbauzugs bezieht. Der Umfang eines solchen Systems kann projektabhängig festgelegt werden, und die Bewertung erfolgt dann über die Zahl der elektrifizierten Fahrzeuge innerhalb der Gesamtauswahl an Fahrzeugen.

Dieser Ansatz weist zwei wesentliche Eigenschaften auf. Zum einen ist er relativ einfach zu erheben, da auch hier Fahrzeugzahlen im Mittelpunkt stehen. Zum anderen kann ihm eine gewisse Lenkungswirkung zugeschrieben werden, da er Anreize schaffen könnte, zusätzliche elektrische Fahrzeuge in relevante Prozessketten zu integrieren. Inhaltlich bleibt er jedoch stärker strukturorientiert und weniger unmittelbar mit realen Energieverbräuchen oder Emissionswirkungen verbunden.

**Betriebsstunden elektrischer Maschinen**

Für die Baustellendurchführung wird ein Elektrifizierungsindex beschrieben, der auf dem Verhältnis der Betriebsstunden elektrischer Maschinen zu den gesamten Betriebsstunden basiert. Dieser Ansatz ist methodisch näher an der realen Nutzung der Maschinen als eine reine Fahrzeugzählung, da stark frequentierte Maschinen ein höheres Gewicht erhalten als selten genutzte Geräte.

Aus bewertungssystematischer Sicht stellt dies einen relevanten Fortschritt dar, weil die Einsatzintensität in die Kennzahl einfließt. Gleichzeitig ist dafür zumindest eine rudimentäre Form von Telematik oder vergleichbarer Datenerfassung erforderlich. Die höhere Aussagekraft geht somit mit höheren Anforderungen an die Datenverfügbarkeit einher.

**Anteil elektrifizierter Arbeitsschritte**

Ein weiterer Ansatz fokussiert auf den Anteil der mit elektrifizierten Maschinen durchgeführten Arbeitsschritte an allen Arbeitsschritten eines Prozesses. Genannt werden beispielhaft Vorgänge wie Beladen, Transport oder Einbau. Dieser Zugang verschiebt den Fokus von der technischen Ausstattung auf den konkreten Bauprozess und ermöglicht damit eine besonders enge Anbindung an die operative Ausführung.

Damit wird nicht nur erfasst, welche Maschinen vorhanden sind, sondern in welchem Umfang zentrale Prozessschritte tatsächlich elektrifiziert abgewickelt werden. Methodisch ist dies ein besonders prozessorientierter Zugang, der für eine differenzierte Bewertung hohe Relevanz besitzt, zugleich aber auf eine belastbare Prozess- und Datengrundlage angewiesen ist.

### 3.3.5 Methodische Einordnung der Indexvarianten

Die dargestellten Varianten zeigen, dass die unterschiedlichen Definitionen des Elektrifizierungsindex jeweils verschiedene Dimensionen von Elektrifizierung erfassen. Energiebasierte Ansätze messen den realen Ressourceneinsatz besonders präzise und gelten daher als vergleichsweise belastbar. Fahrzeugbezogene Ansätze sind administrativ einfacher umzusetzen, erfassen jedoch überwiegend strukturelle Merkmale und nicht zwingend die tatsächliche Nutzung oder Wirkung. Nutzungs- und prozessorientierte Ansätze auf Basis von Betriebsstunden oder Arbeitsschritten bieten demgegenüber eine höhere Nähe zur realen Projektdurchführung, setzen jedoch eine belastbarere Datengrundlage voraus.

Für die Anwendung in Vergabeverfahren ergibt sich daraus die Notwendigkeit einer Abwägung zwischen Genauigkeit, Praktikabilität, Datenverfügbarkeit und Steuerungswirkung. Eine theoretisch sehr präzise Kennzahl verliert an

Relevanz, wenn sie mit unverhältnismäßigem Aufwand erhoben werden muss. Umgekehrt kann eine sehr einfach handhabbare Kennzahl in ihrer Aussagekraft zu begrenzt sein, um tatsächlich wirksame Anreize für Elektrifizierung zu setzen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der Elektrifizierungsindex als vielseitig einsetzbares Bewertungsinstrument angesehen werden kann, dessen konkrete Form an den jeweiligen Anwendungszweck angepasst werden muss. Keine einzelne Definition erfüllt alle Anforderungen gleichermaßen. Vielmehr sind unterschiedliche Varianten denkbar, die je nach Zielsetzung des Vergabeverfahrens, Verfügbarkeit von Betriebsdaten und gewünschter Steuerungswirkung unterschiedlich geeignet erscheinen.

### 3.3.6 Abgrenzung der Vergabekriterien

Die sechs entwickelten Ansätze wurden in Gesprächen mit Vergabeexperten der ASFINAG, des ASTRA und der Autobahn GmbH hinsichtlich ihrer Praktikabilität, Nachweisbarkeit und vergaberechtlichen Umsetzbarkeit gespiegelt. Im Ergebnis wurden die Kriterien Energiemenge und Punktesystem für Fahrzeugkategorien priorisiert, da sie die Elektrifizierung am belastbarsten abbilden und zugleich mit vertretbarem Erhebungsaufwand umsetzbar sind.

Von diesen beiden Kriterien wurde für die Verankerung in der Vergabephase das Punktesystem für Fahrzeugkategorien ausgewählt. Die Energiemenge bleibt dabei als Nachweis- und Monitoringgröße in der Vertragsphase relevant, ist für die Angebotsphase jedoch nur eingeschränkt geeignet, da belastbare Realdaten aus Telemetrie oder Abrechnungsbelegen erst retrospektiv vorliegen und Bieter bei einer prospektiven Abschätzung vor hohe Herausforderungen gestellt würden. Für das Punktesystem sprechen darüber hinaus vor allem die Marktsignale, die von einem solchen System ausgehen. Ein Punktesystem gibt Herstellern und Käufern von Baumaschinen die notwendige Investitionssicherheit für neue Technologien und trägt dazu bei, die anfänglich hohen Anschaffungskosten elektrifizierter Maschinen abzufedern – ähnlich wie im Automobilsektor führen höhere Stückzahlen langfristig zu einer Kostendegression durch Skaleneffekte. Hinzu kommt eine industriepolitische Dimension. Die europäische Industrie hat marktreife elektrische Maschinen entwickelt, deren Weiterentwicklung ohne Absatzpotenziale zu stoppen droht. Der öffentlichen Hand kommt daher die Verantwortung zu, ihre Marktmacht gezielt zu nutzen, um diese Technologien in die Anwendung zu bringen. Eine über den Lebenszyklus betrachtete $CO_2$-Begrenzung als alternativer Ansatz wurde demgegenüber als nachteilig bewertet. Sie lenkt den Fokus auf rechnerische Vermeidungsmaßnahmen wie den Einsatz von HVO und führt zu keiner direkten $CO_2$-Reduktion lokal auf der Baustelle (Tailpipe-emissions). Der technologische Wandel würde damit verfehlt oder allenfalls verspätet eingeleitet, während über die direkte Förderung der Elektrifizierung ein klares Marktsignal gelingt.

### 3.3.7 Ausarbeitung des Bepunktungssystems

Nachdem das Punktesystem für Fahrzeugkategorien als dasjenige Kriterium identifiziert wurde, das die Elektrifizierung in der Angebotsphase am belastbarsten und zugleich mit vertretbarem Erhebungsaufwand abbildet, wurde dieses zu einem anwendungsreifen Bewertungsinstrument ausgearbeitet. Leitgedanke der Ausarbeitung war, ein System zu schaffen, das ohne Telemetrie- oder Echtzeitdaten auskommt, vom Bieter in der Angebotsphase mit den ohnehin vorliegenden Informationen zur geplanten Geräteausstattung befüllt werden kann und dennoch hinreichend differenziert ist, um zwischen tatsächlich wirksamer Elektrifizierung und rein deklaratorischen Maßnahmen zu unterscheiden.

Die Bewertung erfolgt maschinenscharf. Jedes für den ausgeschriebenen Bauabschnitt vorgesehene Fahrzeug $j$ erhält eine Punktzahl, die sich als Produkt dreier Faktoren ergibt. Die Punktzahl des Angebots ergibt sich als Summe über alle eingeplanten Fahrzeuge:

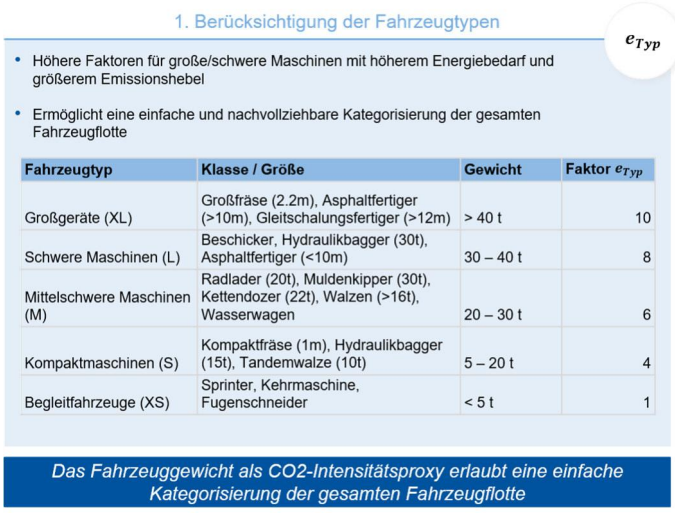
$$P = \sum_j \left( e_{Typ,j} * r_j * a_{Antrieb,j} \right) \quad (2)$$

Der Faktor $e_{Typ}$ bildet die Größenklasse und damit den Energiebedarf der Maschine ab, der Relevanzfaktor r die Rolle der Maschine im Bauprozess und der Antriebsfaktor $a_{Antrieb}$ den Grad der tatsächlichen Elektrifizierung. Die multiplikative Verknüpfung wurde bewusst gewählt. Sie stellt sicher, dass der Elektrifizierungsgrad umso stärker auf die Gesamtpunktzahl durchschlägt, je größer und je einsatzrelevanter die betrachtete Maschine ist. Ein elektrifizierter Großfertiger verbessert das Ergebnis eines Angebots damit deutlich stärker als eine elektrifizierte Kehrmaschine, was der tatsächlichen Emissionswirkung entspricht.

#### Typfaktor $e_{Typ}$

Die erste Komponente des Systems ordnet jedes Fahrzeug einer von fünf Größenklassen entsprechend des Fahrzeuggewichts zu. Diese Klassifizierung ist in Abbildung 53 zu sehen. Als Klassifizierungsmerkmal dient das Einsatzgewicht, das als Proxy für die $CO_2$-Intensität der Maschine herangezogen wird. Die Klassen reichen von Begleitfahrzeugen (XS) wie Sprintern, kleine Kehrmaschinen oder Fugenschneidern über Kompaktmaschinen (S), mittelschwere Maschinen (M) und schwere Maschinen (L) bis hin zu Großgeräten (XL) wie Großfräsen mit 2,2 m Fräsbreite, Asphaltfertigern über 10 m Einbaubreite oder Gleitschalungsfertigern über 12 m Breite. Den Klassen sind Faktoren von 1 bis 10 zugeordnet. Die Wahl des Gewichts als Klassifizierungsmerkmal folgt dem Gedanken der einfachen Handhabbarkeit: Das Einsatzgewicht ist für jede Maschine aus dem Datenblatt eindeutig entnehmbar, unterliegt keiner Auslegung

und ermöglicht damit eine vollständige und nachvollziehbare Kategorisierung des gesamten Fuhrparks ohne zusätzlichen Erhebungsaufwand.




| Fahrzeugtyp | Klasse / Größe | Gewicht | Faktor $e_{Typ}$ |
|---|---|---|---|
| Großgeräte (XL) | Großfräse (2.2m), Asphaltfertiger (>10m), Gleitschalungsfertiger (>12m) | > 40 t | 10 |
| Schwere Maschinen (L) | Beschicker, Hydraulikbagger (30t), Asphaltfertiger (<10m) | 30 – 40 t | 8 |
| Mittelschwere Maschinen (M) | Radlader (20t), Muldenkipper (30t), Kettendozer (22t), Walzen (>16t), Wasserwagen | 20 – 30 t | 6 |
| Kompaktmaschinen (S) | Kompaktfräse (1m), Hydraulikbagger (15t), Tandemwalze (10t) | 5 – 20 t | 4 |
| Begleitfahrzeuge (XS) | Sprinter, Kehrmaschine, Fugenschneider | < 5 t | 1 |

*Abbildung 53: Einführung des Typfaktors*

### Relevanzfaktor $r$

Der Relevanzfaktor $r$ ergänzt diese rein technische Klassifizierung um die Funktion der Maschine im Bauprozess. Unterschieden werden Transportfahrzeuge der sogenannten „weißen Flotte“ mit einem Faktor von 1,2, Kern-Arbeitsmaschinen der „gelben Flotte“ mit einem Faktor von 1,0 sowie Neben-Arbeitsmaschinen mit einem Faktor von 0,6. Eine Übersicht über diese Kategorien ist in Abbildung 54 zu sehen. Hintergrund dieser Differenzierung ist der Umstand, dass Logistikfahrzeuge im Straßenbau hohe Laufleistungen erbringen und zugleich technologisch am weitesten für eine Elektrifizierung erschlossen sind, während Neben-Arbeitsmaschinen nur punktuell zum Einsatz kommen. Der Relevanzfaktor richtet die Bewertung damit gezielt auf die wesentlichen Emissionstreiber aus und verhindert, dass Angebote durch eine breite Elektrifizierung selten genutzter Randgeräte aufgewertet werden.

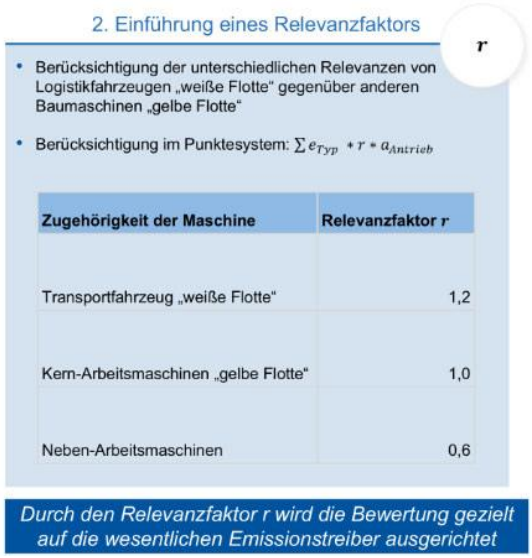



*Abbildung 54: Einführung des Relevanzfaktors*

### Antriebsfaktor $a_{Antrieb}$

Die dritte und differenzierteste Komponente des Systems ist der Antriebsfaktor $a_{Antrieb}$, der den tatsächlichen Elektrifizierungsgrad einer Maschine abbildet. In Abbildung 55 ist eine Übersicht zu diesem Faktor zu sehen. Er setzt sich aus einem Grundwert nach Antriebstyp sowie aus Anpassungen für die Energiequelle und für ressourcensparende Betriebs-technologien zusammen. Der Grundwert reicht von 0,9 für vollelektrische Maschinen im Batterie- oder Netzbetrieb über die Abstufungen der Hybridtypen bis hin zu 0,25 für konventionelle Maschinen der Abgasstufe Stage V mit dokumentiertem HVO-Nachweis und 0,10 für Stage-V-Maschinen ohne HVO. Der Höchstwert des Antriebsfaktors beträgt 1,0 und wird erst durch den nachfolgend beschriebenen Zuschlag auf die Energiequelle erreicht. Maschinen mit einer Abgasstufe unterhalb Stage V erhalten den Wert 0 und tragen damit nicht zur Punktzahl bei. Diese Nullbewertung ist bewusst gesetzt: Sie stellt sicher, dass der Einsatz veralteter Gerätetechnik keinerlei Anrechnung erfährt, unabhängig davon, wie groß oder relevant die betreffende Maschine ist.

Ergänzend wird die Herkunft der elektrischen Energie berücksichtigt. Wird nachgewiesener Ökostrom eingesetzt, erhöht sich der Antriebsfaktor um 0,1; bei Netzstrom unbekannter Herkunft erfolgt keine Anpassung. Wird die elektrische Energie hingegen fossil erzeugt, etwa über einen Dieselgenerator, wird der Antriebsfaktor auf 0 gesetzt. Damit wird der zentrale Fehlanreiz eines rein antriebsbezogenen Systems ausgeschlossen, nämlich die Verlagerung der Emissionen vom Fahrzeug auf die baustelleneigene Energieerzeugung. Der

Zuschlag wird nur für vollelektrische Maschinen gewährt, deren Energieeinsatz vollständig extern bezogen und damit lückenlos nachweisbar ist.

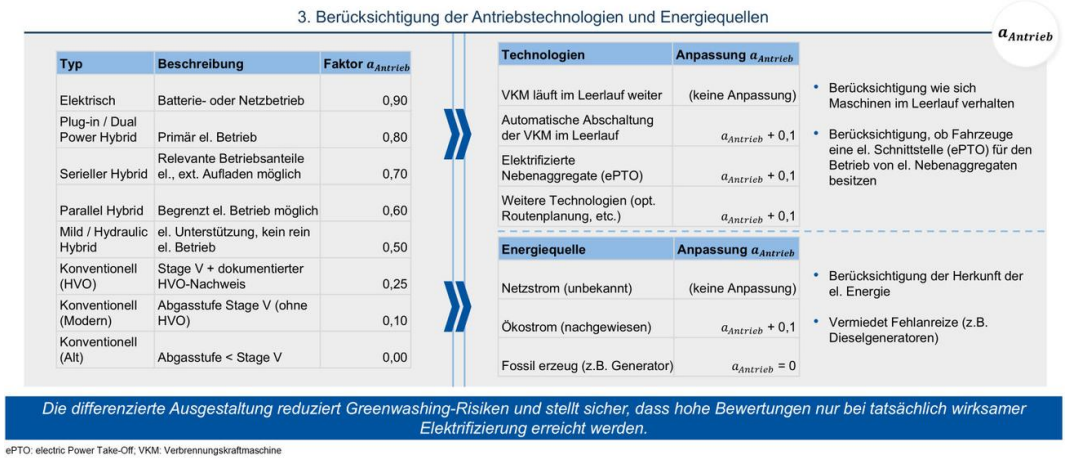



*Abbildung 55: Einführung des Antriebsfaktors*

### Differenzierung der Hybridantriebe

Da der Begriff des Hybridantriebs im Maschinenbau sehr unterschiedliche technische Ausprägungen umfasst, wurde die Abstufung innerhalb der Hybride gesondert ausgearbeitet. Abbildung 56 zeigt diese Hybridabstufungen. Maßgeblich für die Einordnung ist, welcher Anteil der auf der Baustelle erbrachten Arbeit tatsächlich elektrisch geleistet werden kann. Plug-in- beziehungsweise Dual-Power-Hybride erhalten mit 0,8 den höchsten Wert, da sie über einen externen Netzanschluss oder eine große Batterie verfügen und die eigentliche Arbeitsleistung elektrisch erbringen, während die Verbrennungskraftmaschine im Wesentlichen der Mobilität und Überführung der Maschine dient. Serielle Hybride, bei denen die Verbrennungskraftmaschine einen Generator antreibt und Fahr- sowie Arbeitsmotoren elektrisch ausgeführt sind, werden mit 0,7 bewertet. Parallele Hybride, bei denen Verbrennungsmotor und elektrische Maschine beide mechanische Antriebsleistung abgeben und die E-Maschine primär Lastspitzen und Nebenaggregate unterstützt, erhalten 0,6. Mild- und Hydraulikhybride schließlich, bei denen die Verbrennungskraftmaschine Hauptantrieb bleibt und lediglich Brems- oder Hydraulikenergie zurückgewonnen wird, werden mit 0,5 bewertet. Diese Differenzierung ist wesentlich für die Greenwashing-Resistenz des Systems, da sie verhindert, dass die bloße Bezeichnung einer Maschine als „Hybrid“ bereits zu einer hohen Bewertung führt.

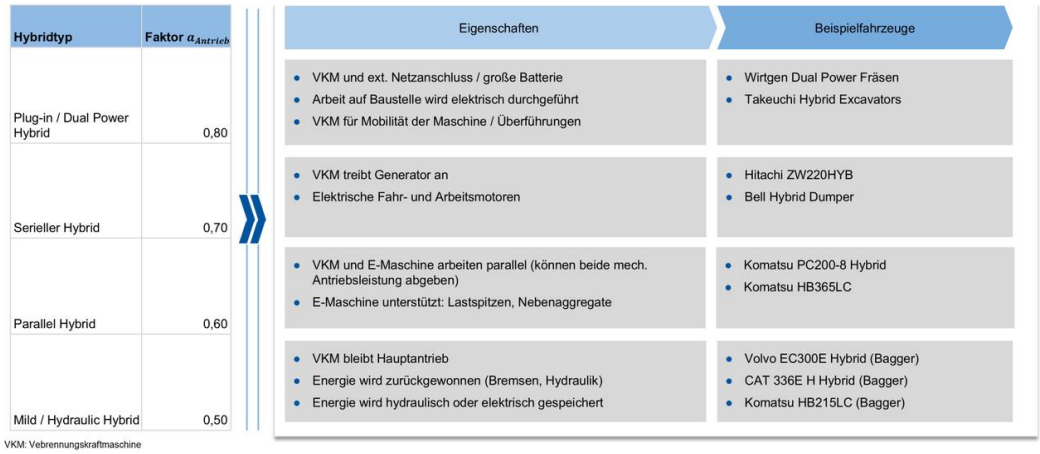



*Abbildung 56: Differenzierung der Hybridantriebe*

### Berücksichtigung ressourcensparender Technologien

Über den Antriebsstrang hinaus werden Technologien berücksichtigt, die den Energiebedarf im realen Betrieb senken, ohne die Antriebsart selbst zu verändern. Abbildung 57 zeigt dazu einen Überblick. Erfasst werden die automatische Abschaltung der Verbrennungskraftmaschine bei längerer Inaktivität, elektrifizierte Nebenaggregate über eine ePTO-Schnittstelle (electric Power Take-Off), sowie weitere effizienzsteigernde Technologien wie eine bedarfsgerechte Regelung der Hydraulikleistung. Wird mindestens eine dieser Technologien nachgewiesen, erhöht sich der Antriebsfaktor um 0,1. Der Zuschlag setzt einen Verbrennungsmotor voraus, da er dessen unproduktiven Energieeinsatz adressiert; bei vollelektrischen Maschinen sind die entsprechenden Eigenschaften bereits im Grundwert enthalten. Eine reine Drehzahlabsenkung im Leerlauf ohne tatsächliche Motorabschaltung führt hingegen zu keiner Anpassung. Die Berücksichtigung dieser Technologien ist insofern bedeutsam, als Leerlaufzeiten und permanent mitlaufende Nebenaggregate im Straßenbau einen erheblichen Anteil des Kraftstoffverbrauchs verursachen, ohne dass ihnen eine produktive Leistung gegenübersteht. Zugleich wird damit eine Brücke für Bestandsflotten geschaffen: Bieter, die kurzfristig nicht auf vollelektrische Maschinen umstellen können, erhalten einen Anreiz, ihre konventionellen Geräte in Richtung eines effizienteren Betriebsverhaltens weiterzuentwickeln.

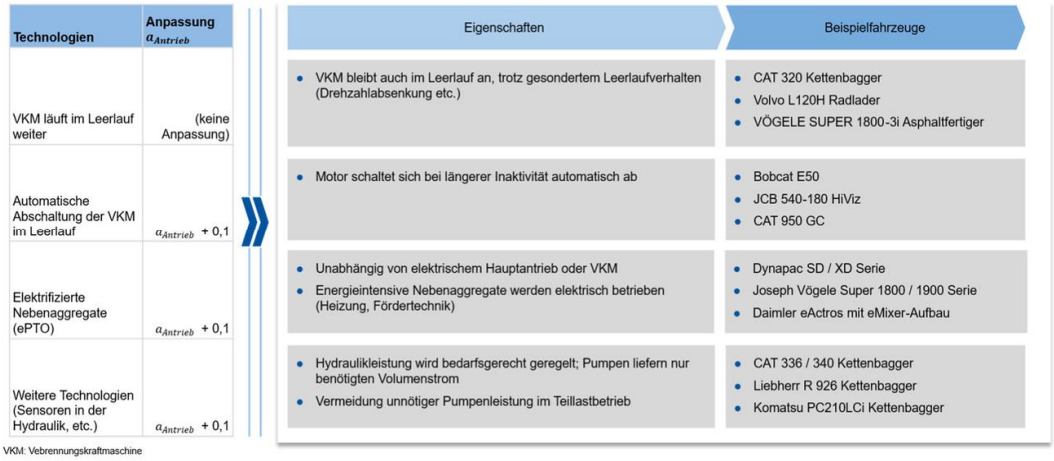



*Abbildung 57: Berücksichtigung von ressourcensparenden Technologien*

## Abwägung der Faktoren

Die entwickelten Faktoren wurden abschließend gegen fünf Anforderungen gespiegelt, die sich aus dem Projektkontext ergaben. Dazu zählen die einfache Handhabung für den Bieter, Eingliederung in die aktuelle Ausschreibungslogik, Wirkung als Marktsignal, einfache Administrierbarkeit für den Auftraggeber sowie physikalisch möglichst exakte Abbildung des $CO_2$-Impacts. Die Administrierbarkeit wurde dabei anhand zweier Leitfragen bewertet, nämlich wie schwer es fällt, Regelverstöße überhaupt zu erkennen, und wie schwer es fällt, im Streitfall eine Einigung darüber zu erzielen, ob die Regel tatsächlich verletzt wurde. Abbildung 58 zeigt diese Bewertung der entwickelten Faktoren.

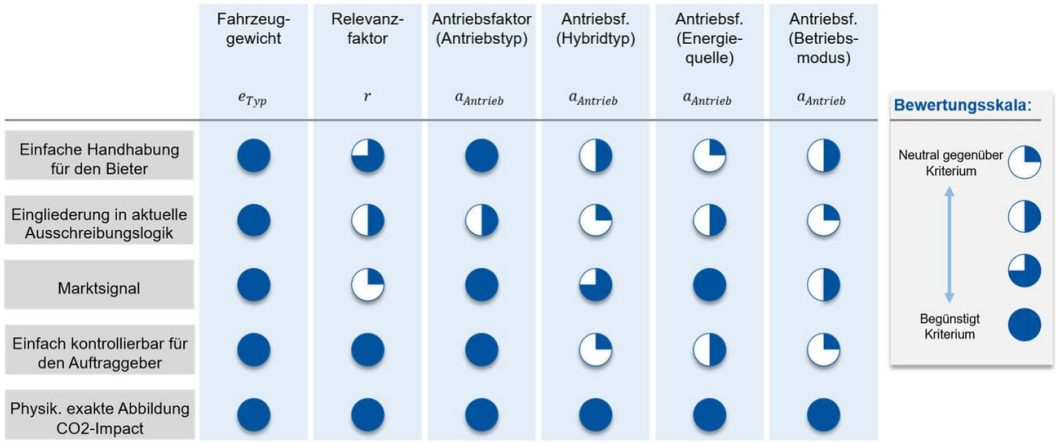



*Abbildung 58: Abwägung der möglichen Faktoren des Nachhaltigkeitspunktesystems*

Die Abwägung zeigt, dass Fahrzeuggewicht und Antriebstyp alle fünf Anforderungen weitgehend erfüllen und damit das tragende Gerüst des Systems bilden. Der Relevanzfaktor verbessert die physikalische Abbildungsgüte und ist gut administrierbar, erfordert vom Bieter jedoch eine Zuordnungsentscheidung und entfaltet für sich genommen nur ein schwaches Marktsignal. Die Differenzierung nach Hybridtyp erhöht die Genauigkeit und die Greenwashing-Resistenz deutlich, stellt aber sowohl an den Bieter als auch an die Vergabestelle höhere Anforderungen, da die Einordnung technisches Verständnis des Antriebsstrangs voraussetzt. Ähnliches gilt für die Anpassungen nach Energiequelle und Betriebsmodus, die inhaltlich wichtig, in der Nachweisführung jedoch aufwendiger sind. Aus dieser Abwägung folgt eine wesentliche Gestaltungsempfehlung. Das System ist modular aufgebaut und kann von der Vergabestelle in unterschiedlicher Tiefe angewendet werden. In einer schlanken Ausbaustufe genügen Fahrzeuggewicht, Relevanzfaktor und Antriebstyp. Die Differenzierung nach Hybridtyp, Energiequelle und Betriebsmodus kann ergänzt werden, wenn die Vergabestelle über die entsprechenden Prüf- und Nachweiskapazitäten verfügt oder wenn die Elektrifizierung des Marktes so weit fortgeschritten ist, dass eine feinere Auflösung erforderlich wird.

**Überführung der Punktzahl in den Wertungspreis**

Die ermittelte Gesamtpunktzahl ist für sich genommen eine dimensionslose Größe und lässt sich nicht unmittelbar zwischen Angeboten vergleichen, da sie mit dem Umfang der eingeplanten Flotte skaliert. Ein Bieter mit einer größeren, aber weniger elektrifizierten Flotte könnte andernfalls eine höhere absolute Punktzahl erreichen als ein Bieter mit einer schlanken, vollständig elektrifizierten Geräteausstattung. Zur Normierung wird daher der Punktzahl des Angebots $P_{real}$ die maximal erreichbare Punktzahl $P_{max}$ gegenübergestellt, die sich ergibt, wenn sämtliche eingeplanten Fahrzeuge vollelektrisch betrieben würden und damit für alle Maschinen $a_{Antrieb} = 1$ gilt. Dieses Vorgehen ist auch in Abbildung 59 zu sehen:

$$P_{real} = \sum_j \left(e_{Typ,j} * r_j * a_{Antrieb,j}\right) \quad (3)$$

$$P_{max} = \sum_j \left(e_{Typ,j} * r_j\right) \quad (4)$$

$$i = \frac{P_{real}}{P_{max}} \quad (5)$$

Der so gebildete Quotient $i$ stellt den eigentlichen Elektrifizierungsindex dar. Er nimmt Werte zwischen 0 und 1 an, ist unabhängig von der Größe des Bauvorhabens und der Anzahl der eingeplanten Maschinen und beschreibt, welchen Anteil des maximal möglichen Elektrifizierungspotenzials der jeweilige Bieter mit seiner geplanten Geräteausstattung ausschöpft. Die Bezugnahme auf die vom Bieter selbst eingeplante Flotte ist dabei bewusst gewählt. Sie macht eine

zentrale Vorgabe von Referenzflotten je Bauverfahren entbehrlich und hält das System damit auch für heterogene Bauvorhaben anwendbar.

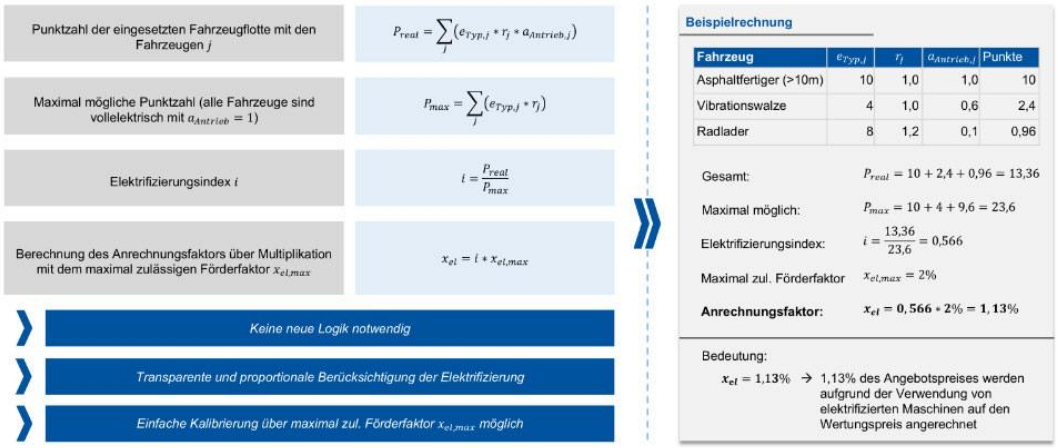



*Abbildung 59: Berechnung des Anrechnungsfaktors*

Aus dem Elektrifizierungsindex wird durch Multiplikation mit dem maximal zulässigen Förderfaktor $x_{el,max}$ der Anrechnungsfaktor $x_{el}$ gebildet. Der Förderfaktor ist der zentrale Stellhebel des Auftraggebers und legt fest, um welchen Anteil ein Angebot bei vollständiger Elektrifizierung im Wertungsverfahren maximal begünstigt werden kann. Wie in Abbildung 60 zu sehen, wird der Anrechnungsfaktor anschließend auf die Angebotskalkulation angewendet und ergibt den Wertungspreis, der dem Angebotsvergleich im offenen Bieterverfahren zugrunde gelegt wird:

$$x_{el} = i * x_{el,max} \tag{6}$$

$$Wertungspreis = Angebotskalkulation * (1 - x_{el}) \tag{7}$$

Der Wertungspreis ist dabei ausschließlich eine Vergleichsgröße für die Angebotswertung; die Vergütung erfolgt unverändert auf Basis der tatsächlichen Angebotskalkulation. Der Auftraggeber steuert über $x_{el,max}$ unmittelbar die Stärke des gesetzten Anreizes und kann diesen im Zeitverlauf schrittweise anheben, um dem fortschreitenden Markthochlauf elektrifizierter Baumaschinen Rechnung zu tragen. Der Bieter wiederum verbessert seine Position, indem er den Elektrifizierungsanteil bei der Einsatzplanung der auf der Baustelle vorgesehenen Fahrzeuge erhöht. Damit entsteht eine transparente, proportionale und vergaberechtskonform anwendbare Bewertungslogik, die ohne die Einführung einer grundlegend neuen Zuschlagssystematik in bestehende Verfahren integriert werden kann und sich, wie die Gespräche mit den Vergabestellen

bestätigt haben, sowohl auf das Wertungsmodell der Autobahn GmbH als auch auf die Bestbieterlogik der ASFiNAG übertragen lässt.

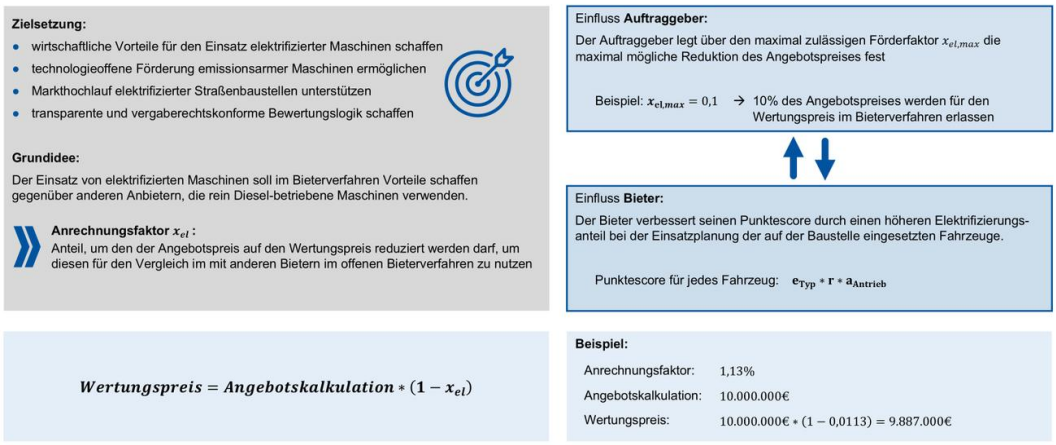



*Abbildung 60: Berechnung des Wertungspreises für den Angebotsvergleich*

Die konkrete Belegung der Faktoren $e_{Typ}$, $r$ und $a_{Antrieb}$ mit Zahlenwerten sowie die Festlegung eines angemessenen Förderfaktors $x_{el,max}$ sind mit der beschriebenen Systematik noch nicht abschließend begründet. Die hierfür durchgeführte Kalibrierung des Systems anhand realer Maschinendaten wird im folgenden Kapitel dargestellt.

### 3.3.8 Kalibrierung des Bepunktungssystems

Das in Unterabschnitt 3.3.7 beschriebene Bepunktungssystem legt die Struktur der Bewertung fest. Damit das System in einem Vergabeverfahren belastbar angewendet werden kann, müssen die Faktoren $e_{Typ}$, $r$ und $a_{Antrieb}$ so belegt sein, dass die resultierenden Punktzahlen die tatsächlichen Größenverhältnisse der eingesetzten Flotte widerspiegeln und nicht das Ergebnis einer freien Setzung sind. Die Kalibrierung wurde daher parameterweise vorgenommen und beginnt mit dem Fahrzeugfaktor $e_{Typ}$, da dieser den größten Wertebereich abdeckt und damit den stärksten Einfluss auf die Gesamtpunktzahl eines Angebots hat.

#### Typfaktor $e_{Typ}$

Als Grundlage der Kalibrierung wurde ein Katalog von 36 Referenzfahrzeugen aufgebaut, der die im Autobahnbau typischerweise eingesetzten Geräte abdeckt. Für jedes Referenzfahrzeug wurden die zwei Kenngrößen Einsatzgewicht sowie der Energieverbrauch je Betriebsstunde erhoben. Die Einsatzgewichte stammen durchgehend aus den Datenblättern der Hersteller. Die

Verbrauchswerte beruhen auf den Betriebsdaten, die im Rahmen der in Abschnitt 2.6 untersuchten Praxisbeispiele ermittelt wurden, und wurden, soweit verfügbar, durch Herstellerangaben sowie durch die Flottendaten von Zeppelin Rental ergänzt; andernfalls wurden sie über die Ansätze der Erhaltungsrichtlinie und ergänzende Abschätzungen bestimmt. Sämtliche Verbräuche wurden einheitlich in Kilowattstunden je Betriebsstunde angegeben, um Maschinen mit Verbrennungs- und mit elektrischem Antrieb auf einer gemeinsamen energetischen Basis vergleichbar zu machen. Der vollständige Katalog der Referenzfahrzeuge mit Fahrzeugtyp, Größenklasse, Einsatzgewicht, Energieverbrauch und Quelle ist in der Tabelle in Anhang 3 aufgeführt.

Jedes Referenzfahrzeug wurde anschließend einer der fünf in Unterabschnitt 3.3.7 eingeführten Größenklassen zugeordnet. Wie die Anzahl der je Klasse zugeordneten Fahrzeuge in Tabelle 13 zeigt, sind die Klassen dabei bewusst ungleich besetzt. Das mittlere Gewichtssegment umfasst mit Abstand die meisten Referenzfahrzeuge, während die Randklassen deutlich schwächer besetzt sind. Diese Verteilung entspricht der Struktur eines realen Straßenbauzugs, in dem das mittlere Gewichtssegment sowohl einen erheblichen Teil der Kernarbeitsmaschinen als auch den überwiegenden Teil der Transportfahrzeuge stellt.

Für jede Größenklasse wurde aus den zugehörigen Referenzfahrzeugen das arithmetische Mittel des Einsatzgewichts sowie das arithmetische Mittel des Energieverbrauchs gebildet. Beide Kennwerte sind in Tabelle 13 je Klasse gegenübergestellt. Sie bilden die Grundlage der Kalibrierung und erlauben zugleich die Prüfung der Annahme, auf der die Verwendung des Einsatzgewichts als Klassifizierungsmerkmal beruht, nämlich dass das Gewicht einer Baumaschine mit ihrem Energiebedarf und damit mit ihrem Emissionsbeitrag zusammenhängt.

Diese Prüfung erfolgt bewusst auf Klassenebene und nicht auf Ebene der Einzelfahrzeuge. Betrachtet man die Referenzfahrzeuge einzeln, weichen mehrere Maschinentypen erkennbar von einem gewichtsproportionalen Energiebedarf ab. Großfräsen und Gleitschalungsfertiger weisen bei vergleichsweise moderatem Einsatzgewicht einen sehr hohen spezifischen Energiebedarf auf, während umgekehrt ein mobiler Asphalt-Transportkocher trotz hohen Einsatzgewichts nur einen geringen Energiebedarf hat, da er im Wesentlichen als beheizter Transportbehälter dient. Für das Bepunktungssystem ist diese Streuung jedoch nicht maßgeblich, da die Bewertung nicht auf der einzelnen Maschine, sondern auf der Größenklasse aufsetzt. Entscheidend ist allein, dass die Klassen nach Einsatzgewicht und nach Energieverbrauch in dieselbe Reihenfolge gebracht werden. Der Vergleich der beiden Mittelwertspalten in Tabelle 13 bestätigt dies. Die Rangfolge der Klassen ist nach beiden Kenngrößen identisch, sodass das Einsatzgewicht als Proxy für den Energiebedarf verwendet werden kann.

Für die eigentliche Kalibrierung wurden die mittleren Einsatzgewichte der Klassen linear auf eine Skala von 1 bis 10 normiert, wobei die leichteste Klasse den unteren und die schwerste Klasse den oberen Skalenwert erhält. Mit $m_k$ als mittlerem Einsatzgewicht der Klasse k ergibt sich:

$$e_{Typ,k} = 1 + 9 \cdot \frac{m_k - m_{XS}}{m_{XL} - m_{XS}} \quad (8)$$

Zur Kontrolle wurde dieselbe Normierung ein zweites Mal validiert, diesmal auf Basis der mittleren Energieverbräuche der Klassen. Die Ergebnisse beider Rechnungen sind in Tabelle 13 in den beiden rechten Spalten einander gegenübergestellt. Der verbrauchsbezogene Ansatz führt zwar zur selben Rangfolge, staucht die drei mittleren Klassen jedoch deutlich zusammen und trennt die Großgeräte sehr stark ab. Ursache hierfür sind die bereits genannten Fräsen und Gleitschalungsfertiger, deren hohe Anschlussleistung den Mittelwert der obersten Klasse nach oben zieht. Eine solche Skala würde dazu führen, dass die Elektrifizierung mittelschwerer und schwerer Maschinen im Angebotsvergleich kaum noch ins Gewicht fällt, obwohl diese Klassen den Großteil der eingesetzten Geräte stellen. Der gewichtsbezogene Ansatz verteilt die Klassen demgegenüber annähernd gleichmäßig über den Wertebereich und setzt damit über alle Größenklassen hinweg wirksame Anreize. Er wurde daher als maßgebliche Kalibrierung des Faktors $e_{Typ}$ ausgewählt, während die verbrauchsbezogene Rechnung als Plausibilitätsprüfung dient.

Die auf diese Weise ermittelten Werte wurden abschließend auf ganze Zahlen gerundet. Die daraus resultierenden Faktoren $e_{Typ}$ je Größenklasse, die im Vergabeverfahren zur Anwendung kommen, sind in Tabelle 13 aufgeführt. Die Rundung ist mit Blick auf die praktische Anwendung sinnvoll, da sie die Bewertung für Bieter und Vergabestelle nachvollziehbar hält, ohne die aus den Referenzdaten abgeleiteten Verhältnisse wesentlich zu verändern.

*Tabelle 13: Kalibrierung des Typfaktors anhand der Referenzfahrzeuge*

| *Klasse* | *Anzahl Fahrzeuge* | *∅ Einsatzgewicht [kg]* | *∅ Verbrauch [kWh/h]* | *e_typ (Gewichtsbezug)* | *e_typ (Verbrauchsbezug)* |
|---|---|---|---|---|---|
| **Begleitfahrzeug (XS)** | 5 | 2.980 | 50,6 | 1 | 1 |
| **Kompaktmaschinen (S)** | 5 | 14.600 | 118,0 | 4 | 2 |
| **Mittelschwere Maschinen (M)** | 17 | 25.933 | 172,2 | 6 | 3 |
| **Schwere Maschine (L)** | 6 | 34.483 | 217,8 | 8 | 4 |
| **Großgeräte (XL)** | 3 | 41.267 | 527,5 | 10 | 10 |

## Relevanzfaktor $r$

Der Typfaktor bildet mit dem Energiebedarf je Betriebsstunde nur eine der beiden Größen ab, aus denen sich der Emissionsbeitrag einer Maschine zusammensetzt. Maßgeblich ist das Produkt aus stündlichem Energiebedarf und der Zahl der über das Bauvorhaben geleisteten Betriebsstunden. Die zweite Größe erfasst der Relevanzfaktor, dessen Kalibrierung sich an den über alle Bauphasen kumulierten Betriebsstunden eines einzelnen Fahrzeugs ausrichtet.

Als Datengrundlage dienen die in Abschnitt 2.6 dargestellten Praxisbeispiele. Diese unterscheiden zwischen Neubau- und Sanierungsbaustellen, die sich in Flottenzusammensetzung und Bauablauf deutlich voneinander unterscheiden. Für die Kalibrierung wurden ausschließlich die Sanierungsszenarien herangezogen, da die Erhaltung den überwiegenden Teil der Bauleistung im Bestandsnetz ausmacht. Hinzu kommt, dass die Neubauszenarien Neben-Arbeitsmaschinen nicht abbilden und sich aus ihnen für eine der drei Kategorien folglich kein Wert ableiten ließe. Betrachtet wurden die fünf Sanierungstypen mit insgesamt 86 Bauphasen und 264 Einzeldatensätzen. Für jede Bauphase sind der

eingesetzte Fahrzeugtyp, die Anzahl der eingesetzten Fahrzeuge, ein Auslastungsfaktor sowie die maximalen Betriebsstunden der Phase hinterlegt.

Im ersten Schritt wurden die 20 in den Sanierungsszenarien auftretenden Fahrzeugtypen nach ihrer Funktion im Bauablauf den drei in Abbildung 54 eingeführten Kategorien zugeordnet. Die vollständige Zuordnung ist in Tabelle 14 aufgeführt. Sie stellt die einzige Setzung innerhalb der Kalibrierung dar, alle weiteren Rechenschritte folgen unmittelbar aus den Betriebsdaten.

*Tabelle 14: Zuordnung der Fahrzeugtypen zu den Flottenkategorien*

| ***Kategorie*** | ***Fahrzeugtypen*** |
|---|---|
| **Transportfahrzeug (weiße Flotte)** | Lkw mit Kran, Sprinter, Transport-Lkw, Transportkocher-Lkw, Transportmischer |
| **Kern-Arbeitsmaschine (gelbe Flotte)** | Bagger, Beschicker, Gleitschalungsfertiger, Grader, Großfräse, Gussasphalteinbaubohle, Radlader, Straßenfertiger, Tandemwalze |
| **Neben-Arbeitsmaschine** | Fugenschneider, Kanalspülwagen, Kehrmaschine, Sprüh-Lkw, Vergusskocher, Wasserwagen |

Im zweiten Schritt wurden die kumulierten Betriebsstunden je Fahrzeugtyp bestimmt. Aus dem Produkt von Fahrzeuganzahl, Auslastungsfaktor und maximalen Betriebsstunden ergeben sich zunächst die Betriebsstunden je Fahrzeugklasse und Bauphase. Diese wurden über alle Bauphasen eines Sanierungstyps aufsummiert und anschließend durch die Zahl der maximal gleichzeitig eingesetzten Fahrzeuge desselben Typs geteilt, da die Fahrzeuge zwischen den Bauphasen weiterverwendet und nicht je Phase neu vorgehalten werden. Ergebnis dieses Schritts sind die kumulierten Betriebsstunden je Einzelfahrzeug, aufgeschlüsselt nach Fahrzeugtyp und Sanierungstyp.

Im dritten Schritt wurden diese Werte je Sanierungstyp zu den drei Kategorien zusammengefasst, indem die Betriebsstunden aller Fahrzeuge einer Kategorie durch die Zahl der Fahrzeuge dieser Kategorie geteilt wurden. Die so gebildeten mittleren Betriebsstunden je Fahrzeug wurden abschließend ins Verhältnis zu den Kern-Arbeitsmaschinen der gelben Flotte gesetzt, die im Bepunktungssystem den Bezugsfall bilden und damit definitionsgemäß den Wert 1,0 erhalten. Aus diesem Verhältnis ergibt sich der Relevanzfaktor je Sanierungstyp unmittelbar. Die Ergebnisse dieser Rechnung sind in Anhang 4 zusammengefasst.

Um schließlich die Relevanzfaktoren über alle Sanierungstypen hinweg zu erhalten, wurden die Mittelwerte der Faktoren in den einzelnen Kategorien

berechnet. Die Ergebnisse dieser Rechnung sind in Tabelle 15 zusammengefasst. Transportfahrzeuge der weißen Flotte erbringen über ein Sanierungsvorhaben im Mittel rund ein Fünftel mehr Betriebsstunden je Fahrzeug als Kern-Arbeitsmaschinen, während Neben-Arbeitsmaschinen mit einem Relevanzfaktor von 0,6 deutlich darunter liegen.

*Tabelle 15: Kalibrierung des Relevanzfaktors anhand der Sanierungsszenarien (für die weiterführende Berechnung, siehe Anhang 4)*

| ***Kategorie*** | ***Anzahl Fahrzeugtypen*** | ***Ø Betriebsstunden je Fahrzeug [h]*** | ***r (Mittelwert)*** | ***Spanne über die Sanierungstypen*** | ***r kalibriert*** |
|---|---|---|---|---|---|
| **Transportfahrzeug (weiße Flotte)** | 5 | 158,3 | 1,21 | 1,02 – 1,37 | 1,2 |
| **Kern-Arbeitsmaschine (gelbe Flotte)** | 9 | 133,3 | 1,00 | Bezugswert | 1,0 |
| **Neben-Arbeitsmaschine** | 6 | 71,2 | 0,61 | 0,41 – 0,97 | 0,6 |

Die berechneten Werte wurden abschließend auf eine Nachkommastelle gerundet. Daraus ergeben sich die im Vergabeverfahren anzuwendenden Faktoren von 1,2 für Transportfahrzeuge der weißen Flotte, 1,0 für Kern-Arbeitsmaschinen der gelben Flotte und 0,6 für Neben-Arbeitsmaschinen. Die Rundung folgt derselben Überlegung wie beim Typfaktor und hält die Bewertung für Bieter und Vergabestelle handhabbar, ohne die aus den Praxisbeispielen abgeleiteten Verhältnisse wesentlich zu verändern. Der Relevanzfaktor richtet die Bewertung damit auf die tatsächlichen Emissionstreiber der Baustelle aus und verhindert, dass Angebote durch eine breite Elektrifizierung selten genutzter Randgeräte aufgewertet werden.

### Antriebsfaktor $a_{Antrieb}$

Der Antriebsfaktor unterscheidet sich in seiner Herleitung grundlegend von den beiden übrigen Faktoren. Während Typ- und Relevanzfaktor unmittelbar aus den Betriebsdaten der Praxisbeispiele abgeleitet werden konnten, ist eine datenbasierte Kalibrierung im engeren Sinne hier nicht möglich. Die

Praxisbeispiele enthalten keine Hybridmaschinen, sodass für die Abstufung der Hybridtypen keine Messgrundlage vorliegt. Die Grundwerte der Antriebstypen wurden daher anhand eines durchgängigen technischen Kriteriums gesetzt und über die Zuschläge gegeneinander abgegrenzt.

Der Antriebsfaktor ist so aufgebaut, dass sein Höchstwert 1,0 beträgt und nur von einer Maschine erreicht wird, die vollständig elektrisch betrieben und zugleich mit nachgewiesen erneuerbarer Energie versorgt wird. Der Grundwert einer batterieelektrischen Maschine liegt daher bei 0,9 und nicht bei 1,0. Diese Setzung folgt der Überlegung, dass der Antriebsstrang allein noch keine emissionsfreie Leistungserbringung sicherstellt, solange die Herkunft der Energie offenbleibt. Die verbleibenden 0,1 sind dem Herkunftsnachweis vorbehalten. Durch die Begrenzung auf 1,0 entspricht die maximal erreichbare Punktzahl zugleich unmittelbar dem Produkt aus Typ- und Relevanzfaktor, sodass der Elektrifizierungsindex den Wert 1 konstruktionsbedingt nicht überschreiten kann.

Neben dem Antriebstyp berücksichtigt der Antriebsfaktor zwei weitere Aspekte, die über Zuschläge abgebildet werden. Beide verfolgen weniger das Ziel, die Emissionswirkung exakt abzubilden, als vielmehr Fehlanreize zu vermeiden, die ohne sie in der Systematik entstünden.

Der erste Zuschlag betrifft die Herkunft der eingesetzten Energie. Ein Bewertungssystem, das allein die Antriebstechnologie berücksichtigt, vernachlässigt die Frage, woher der Strom stammt. Ein Bieter könnte eine vollelektrische Flotte anbieten und diese über Dieselgeneratoren auf der Baustelle versorgen, ohne dass sich dies in der Bewertung niederschlägt. Die Emissionen würden lediglich vom Antriebsstrang auf die baustelleneigene Energieerzeugung verlagert. Der Faktor schafft zwei Anreize dagegen. Für nachgewiesenen Ökostrom wird ein Zuschlag von 0,1 gewährt, sodass sich der Aufwand des Herkunftsnachweises in der Wertung abbildet. Wird die Energie dagegen fossil vor Ort erzeugt, entfällt die Anrechnung vollständig, der Antriebsfaktor wird also auf den Wert 0 gesetzt. Damit ist der beschriebene Umweg wirtschaftlich unattraktiv. Der Zuschlag wird nur dort gewährt, wo der gesamte Energieeinsatz einer Maschine extern bezogen und damit vollständig zertifizierbar ist. Bei Hybridantrieben, die neben dem Netzbezug weiterhin Kraftstoff verbrauchen, würde ein Herkunftsnachweis nur einen Teil des Energieeinsatzes abdecken, sie bleiben daher ohne diesen Zuschlag.

Der zweite Zuschlag betrifft ressourcensparende Technologien wie die automatische Abschaltung des Verbrennungsmotors im Leerlauf oder eine elektrische Schnittstelle für den Betrieb von Nebenaggregaten. Diese Ausstattungsmerkmale verändern den Antriebstyp nicht und blieben in einer rein antriebsbezogenen Bewertung folglich unberücksichtigt, obwohl sie sich energiesparend

auswirken. Wird mindestens eine solche Technologie nachgewiesen, erhöht sich der Antriebsfaktor um 0,1. Der Zuschlag setzt einen Verbrennungsmotor voraus, da er dessen unproduktiven Energieeinsatz adressiert, bei vollelektrischen Maschinen sind die entsprechenden Eigenschaften bereits im Grundwert enthalten. Seine Höhe ist doppelt begründet. Zum einen folgt sie der Systematik der Gesamtskala, die durchgehend in Zehntelschritten abgestuft ist. Ein Zuschlag muss groß genug sein, um in der Angebotskalkulation ins Gewicht zu fallen, darf eine Maschine aber nicht in die Bewertungsklasse eines höherwertigen Antriebstyps heben.

Die Grundwerte der Antriebstypen folgen einem einheitlichen Kriterium, nämlich dem Anteil der Arbeitsleistung, der elektrisch erbracht werden kann. Batterieelektrische Maschinen erhalten mit 0,9 den höchsten Grundwert, da ihr Antriebsstrang vollständig elektrisch ausgeführt ist. Für die Hybridtypen sinkt der Wert mit abnehmendem elektrischem Leistungsanteil von 0,8 beim Plug-in-Hybrid über 0,7 und 0,6 für serielle und parallele Hybride bis auf 0,5 beim Mildhybrid. Konventionelle Antriebe erhalten mit 0,25 bei Einsatz von HVO100 und 0,10 in der Abgasstufe Stage V bewusst niedrige Grundwerte; unterhalb von Stage V entfällt die Anrechnung vollständig. Die vollständige Belegung ist in Tabelle 16 aufgeführt.

*Tabelle 16: Belegung des Antriebsfaktors nach Antriebstyp*

| ***Antriebstyp*** | ***Grundwert a*** | ***Max. a inkl. Zuschlägen*** |
|---|---|---|
| ***Batterieelektrisch*** | ***0,9*** | ***1,0*** |
| ***Plug-in / Dual-Power-Hybrid*** | ***0,8*** | ***0,9*** |
| ***Serieller Hybrid*** | ***0,7*** | ***0,8*** |
| ***Paralleler Hybrid*** | ***0,6*** | ***0,7*** |
| ***Mild- / Hydraulikhybrid*** | ***0,5*** | ***0,6*** |
| ***Konventionell Stage V mit HVO100*** | ***0,25*** | ***0,35*** |
| ***Konventionell Stage V*** | ***0,10*** | ***0,20*** |
| ***Konventionell unterhalb Stage V*** | ***0,00*** | ***0,00*** |

Die Höhe der konventionellen Grundwerte ergibt sich dabei nicht aus einer eigenständigen Wirkungsbetrachtung, sondern aus dem Zusammenspiel mit den zuvor berechneten Zuschlägen. Die Zuschläge sind so bemessen, dass keine Maschine durch Zusatzausstattung den Grundwert der nächsthöheren Antriebsklasse überschreiten kann. Ein konventioneller Antrieb erreicht mit Technologiezuschlag höchstens 0,35 und liegt damit unterhalb des niedrigsten Hybridgrundwerts von 0,5, ein Plug-in-Hybrid höchstens 0,9 und damit unterhalb des Höchstwerts einer vollelektrischen Maschine. Damit ist sichergestellt, dass jede Maschine einer höheren Elektrifizierungsstufe auch ohne Zusatzausstattung besser bewertet wird als jede Maschine der darunterliegenden Stufe mit vollständiger Ausstattung. Die Abstufung zwischen den Antriebsarten bleibt so unter allen Konstellationen erhalten.

Insgesamt ergibt sich der Antriebsfaktor als Summe aus Grundwert, Zuschlag auf die Energiequelle und Technologiezuschlag, begrenzt auf einen Höchstwert von 1,0. Ein Grundwert von 0,0 führt dabei stets zu einem Antriebsfaktor von 0,0, ebenso die fossile Energieerzeugung auf der Baustelle. Den Höchstwert erreicht allein die vollelektrische Maschine mit Herkunftsnachweis; im Netzstrombetrieb ohne Nachweis erreicht dieselbe Maschine 0,9.

## 3.4 Beispielrechnung

Zur Veranschaulichung der Systematik wird die Bepunktung abschließend an einem realen Fahrzeug nachvollzogen. Abbildung 61 zeigt die Bewertung eines schweren Kettenbaggers mit Diesel-Hybridantrieb, wie sie ein Bieter in der Angebotsphase auf Basis des Herstellerdatenblatts vornehmen würde.

Nach der Spezifikation des Antriebsstrangs handelt es sich um einen parallelen Hybrid, bei dem eine elektrische Maschine zwischen Verbrennungsmotor und Hydraulikpumpe angeordnet ist und die zurückgewonnene Energie in einem Kondensator zwischengespeichert wird. Der Grundwert des Antriebsfaktors beträgt damit 0,6. Da die Maschine zusätzlich über eine automatische Abschaltung des Verbrennungsmotors bei längerer Inaktivität verfügt, erhöht sich dieser Wert um 0,1 auf einen Antriebsfaktor von 0,7. Als Kernarbeitsmaschine der gelben Flotte ist der Bagger mit einem Relevanzfaktor von 1,0 zu bewerten. Mit einem Betriebsgewicht von 36,4 t fällt er in die Größenklasse der schweren Maschinen (L) und erhält damit einen Typfaktor von 8. Aus der multiplikativen Verknüpfung der drei Faktoren ergibt sich für dieses Fahrzeug eine Punktzahl von 5,6.

Das Beispiel verdeutlicht zugleich die Spreizung der Bewertung innerhalb einer Größenklasse. Derselbe Bagger erreichte in vollelektrischer Ausführung mit einem Antriebsfaktor von 1,0 die für seine Größen- und Relevanzeinstufung

maximal möglichen 8,0 Punkte, in konventioneller Ausführung der Abgasstufe Stage V ohne HVO-Nachweis dagegen lediglich 0,8 Punkte. Der Elektrifizierungsgrad der einzelnen Maschine schlägt damit unmittelbar und in nachvollziehbarer Größenordnung auf das Angebotsergebnis durch.

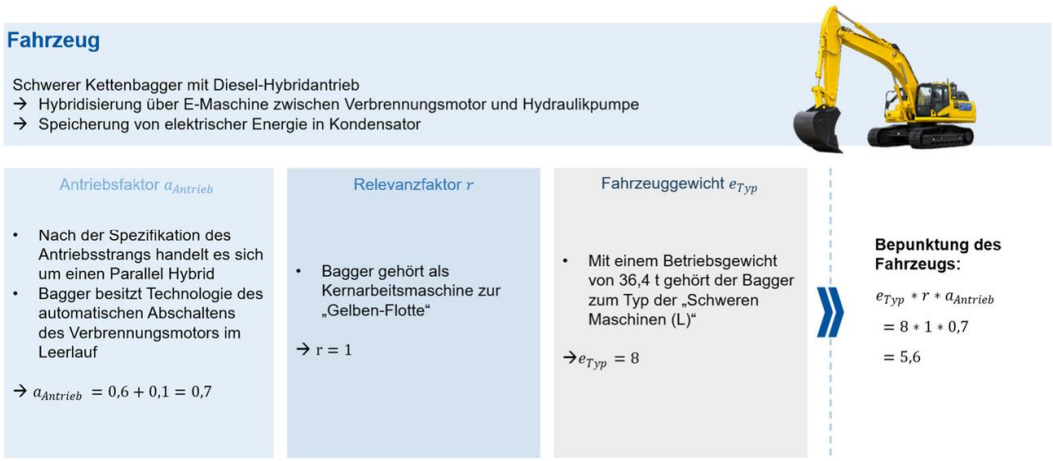



*Abbildung 61: Bepunktung eines Fahrzeugs nach der definierten Systematik*

## 3.5 Einordnung in das Gesamtbild der Zuschlagssystematik

Mit der Kalibrierung liegt ein anwendungsreifes Bewertungsinstrument vor, mit dem die vom Bieter geplante Geräteausstattung in eine vergleichbare Kennzahl überführt werden kann. Seine Wirkung entfaltet dieses Instrument jedoch erst, wenn es in eine durchgängige Systematik eingebettet wird, die über den Zuschlag hinausreicht. Das Bepunktungssystem bewertet die im Angebot vorgesehene Flotte und damit eine planerische Zusage, nicht den tatsächlichen Bauablauf. Genau diese Eigenschaft ist die Voraussetzung dafür, dass es in der Angebotsphase ohne Telemetrie- oder Echtzeitdaten anwendbar bleibt. Zugleich folgt daraus die Notwendigkeit einer zweiten Stufe, die die zugesagte Elektrifizierung in der Bauausführung nachhält.

Aus dieser Überlegung ergibt sich ein zweistufiges Modell, das in Abbildung 62 dargestellt ist. In der ersten Stufe wird in der Ausschreibungs- und Angebotsphase das Bepunktungssystem angewendet und über den Wertungspreis in die Zuschlagsentscheidung überführt. In der zweiten Stufe tritt in der Ausführungsphase das Energiemonitoring an seine Stelle, das den tatsächlichen Energieverbrauch sowie den Einsatz der angebotenen Maschinen auf der Baustelle erfasst. Beide Stufen werden über den Bauvertrag miteinander verknüpft,

sodass aus der Bewertung einer Absichtserklärung eine überprüfbare Verpflichtung wird.

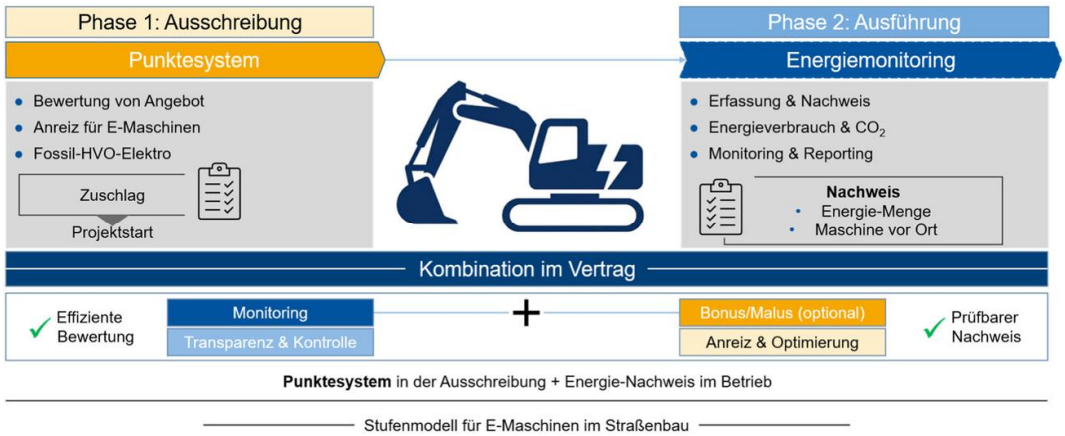



*Abbildung 62: Zweistufiges System zur Integration von Elektrifizierungs-Kriterien im Vergabeverfahren*

Grundlage der zweiten Stufe ist ein belastbares und standardisiertes Monitoring. Erhoben werden insbesondere Energieverbrauch, Einsatzzeiten und die je Maschine tatsächlich eingesetzte Antriebsart, sodass sich der in der Angebotsphase ausgewiesene Elektrifizierungsindex retrospektiv verifizieren lässt. Voraussetzung dafür sind einheitliche Kennzahlen, klare Nachweisformate sowie zunehmend digitalisierte Datenerfassungsprozesse, beispielsweise über Telemetrie oder Energiemonitoring-Systeme. Der damit verbundene Erhebungsaufwand ist in der Ausführungsphase vertretbar, da die entsprechenden Realdaten aus Telemetrie oder Abrechnungsbelegen ohnehin anfallen, während sie in der Angebotsphase abgeschätzt werden müssten. Damit wird die in Unterabschnitt 3.3.6 getroffene Abgrenzung konsequent fortgeführt: Das Punktesystem verankert die Elektrifizierung im Wettbewerb, die Energiemenge sichert sie in der Umsetzung ab.

Auf dieser Grundlage lassen sich gezielte Vertragsmechanismen etablieren. Vertragsstrafen dienen dabei der Absicherung eines definierten Mindestniveaus, etwa wenn der in der Ausführung nachgewiesene Elektrifizierungsgrad den im Angebot zugesagten Wert wesentlich unterschreitet. Ergänzend ermöglichen Bonus- und Malus-Systeme eine differenzierte Steuerung, indem sie sowohl eine Übererfüllung honorieren als auch Abweichungen sanktionieren. Der vertraglichen Absicherung kommt dabei besondere Bedeutung zu, weil der Wertungsvorteil über den Anrechnungsfaktor bereits im Zuschlagsverfahren gewährt wird. Ohne eine Rückkopplung an die tatsächliche Ausführung

entstünde andernfalls der Anreiz, im Angebot eine Elektrifizierung auszuweisen, die auf der Baustelle nicht realisiert wird.

Für die vergaberechtliche Umsetzung ist wesentlich, dass dieses Vorgehen keine grundlegend neue Zuschlagssystematik erfordert. Der Elektrifizierungsindex wirkt ausschließlich über den Wertungspreis und damit über eine Vergleichsgröße, die in den bestehenden Verfahren bereits angelegt ist. Wie die Gespräche mit den Vergabestellen bestätigt haben, lässt sich die Systematik sowohl auf das Wertungsmodell der Autobahn GmbH als auch auf die Bestbieterlogik der ASFiNAG übertragen. Über den maximal zulässigen Förderfaktor verfügt der Auftraggeber zugleich über einen Stellhebel, mit dem sich die Anreizwirkung schrittweise an den Markthochlauf anpassen lässt, ohne die Bewertungslogik selbst zu verändern.

Voraussetzung für eine Anwendung über einzelne Pilotprojekte hinaus ist eine Standardisierung der Faktoren und Nachweisformate, damit Angebote unterschiedlicher Vergabestellen vergleichbar bleiben und der Aufwand für die Bieter kalkulierbar ist. Dabei ist die Marktfähigkeit durchgehend sicherzustellen. Die Anforderungen müssen technisch umsetzbar, wirtschaftlich tragfähig und auch für kleinere Marktteilnehmer zugänglich bleiben. Die in Unterabschnitt 3.3.7 beschriebene modulare Ausgestaltung trägt diesem Anspruch Rechnung, da sie eine schlanke Ausbaustufe ohne Differenzierung nach Hybridtyp, Energiequelle und Betriebsmodus zulässt. Zugleich bleibt die Bewertung technologieoffen, da nicht eine bestimmte Antriebstechnologie vorgeschrieben, sondern der erreichte Elektrifizierungsgrad bewertet wird und auch Zwischenstufen wie Hybridantriebe oder der Einsatz von HVO Berücksichtigung finden.

Insgesamt zeigt sich, dass erst das Zusammenspiel aus Bewertung in der Angebotsphase, Monitoring in der Ausführung und vertraglicher Absicherung die Elektrifizierung von Baustellen systematisch voranzutreiben vermag. Das entwickelte Bepunktungssystem bildet dabei den Einstiegspunkt in diese Kette, weil es das Marktsignal setzt, an dem sich die Investitionsentscheidungen von Bauunternehmen und Herstellern ausrichten können.

## 3.6 Handlungsempfehlung (AP 3.4)

Aus den Untersuchungen des Arbeitspakets 3 wird für die Vergabepraxis empfohlen, die Elektrifizierung über das entwickelte Bepunktungssystem für Fahrzeugkategorien als Zuschlagskriterium zu verankern. Es bildet den Elektrifizierungsgrad einer angebotenen Flotte hinreichend differenziert ab, kommt in der Angebotsphase ohne Telemetrie- oder Echtzeitdaten aus und lässt sich über den Wertungspreis in die bestehenden Wertungsmodelle einfügen, ohne dass eine neue Zuschlagssystematik eingeführt werden muss. Die Energiemenge

sollte demgegenüber nicht als Zuschlagskriterium, sondern als Nachweis- und Monitoringgröße in der Vertrags- und Ausführungsphase herangezogen werden, da belastbare Realdaten erst retrospektiv vorliegen.

Für den Einstieg wird die schlanke Ausbaustufe des Systems empfohlen, die sich auf Typfaktor, Relevanzfaktor und den Grundwert des Antriebsfaktors beschränkt. Sie ist für Bieter mit den ohnehin vorliegenden Angaben zur geplanten Geräteausstattung befüllbar und für die Vergabestelle mit vertretbarem Prüfaufwand administrierbar. Die Differenzierung nach Hybridtyp, Energiequelle und Betriebsmodus sollte ergänzt werden, sobald die erforderlichen Prüf- und Nachweiskapazitäten vorhanden sind oder der Markthochlauf eine feinere Auflösung erforderlich macht.

Die Stärke des Anreizes sollte über den maximal zulässigen Förderfaktor gesteuert und schrittweise entwickelt werden. In einer ersten Einführungsphase empfiehlt sich ein moderater Förderfaktor, mit dem emissionsärmere Angebote bonifiziert werden, ohne kleinere Marktteilnehmer vom Wettbewerb auszuschließen. Mit zunehmender Marktverfügbarkeit elektrifizierter Baumaschinen kann der Förderfaktor angehoben und der Elektrifizierungsindex zusätzlich mit Mindestwerten hinterlegt werden. Entscheidend für die Investitionssicherheit von Bauunternehmen und Herstellern ist dabei weniger die absolute Höhe des Anreizes als dessen frühzeitige Ankündigung und verlässliche Fortschreibung.

Ergänzend wird empfohlen, die im Angebot zugesagte Elektrifizierung vertraglich abzusichern und über ein standardisiertes Energiemonitoring in der Ausführungsphase nachzuhalten. Vertragsstrafen sichern dabei ein Mindestniveau ab, während Bonus- und Malus-Regelungen eine differenzierte Steuerung ermöglichen. Damit das System über einzelne Pilotprojekte hinaus wirkt, sollten Faktoren, Nachweisformate und Monitoringanforderungen zwischen den Vergabestellen abgestimmt und möglichst einheitlich ausgestaltet werden. Eine im D-A-CH-Raum abgestimmte Anwendung würde die Vergleichbarkeit der Angebote erhöhen, den Kalkulationsaufwand für die Bieter senken und das Marktsignal deutlich verstärken.

# 4 Auswirkungen auf die Baubranche (AP 4)

## 4.1 Technische Auswirkungen (AP 4.1)

Die Elektrifizierung von Großbaustellen führt zu einer Verlagerung des Energiebedarfs von fossilen Kraftstoffen hin zu elektrischer Energie. Für die Bewertung der technischen Auswirkungen ist daher sowohl der zusätzliche Energiebedarf auf nationaler Ebene als auch der konkrete Leistungsbedarf auf der einzelnen Baustelle zu untersuchen. Während der jährliche Energiebedarf eine Einordnung der Elektrifizierung in den Gesamtenergieverbrauch der D-A-CH-Länder ermöglicht, ist der Leistungsbedarf insbesondere für die Auslegung der lokalen Energieversorgung, der Ladeinfrastruktur und der erforderlichen Speichersysteme maßgeblich.

### 4.1.1 Abgrenzung der betrachteten Baustellen

Für die Abschätzung des zukünftigen Energiebedarfs wird als Referenzfall die grundhafte Sanierung einer Asphaltstraße zugrunde gelegt. Diese Auswahl begründet sich dadurch, dass es sich bei rund 95 % der Straßenbaumaßnahmen in den D-A-CH-Ländern um Sanierungsarbeiten [74] [75] [76] [77] [78] handelt.

Für die weitere Hochrechnung wird vereinfachend ein Asphaltanteil von rund 70 % angesetzt. Als Referenz dient hierbei das deutsche Autobahnnetz, für das die Autobahn GmbH einen Asphaltanteil von rund 70 % ausweist [79]. Auch für Österreich weist der Netzzustandsbericht der ASFINAG einen überwiegenden Anteil der Asphaltbauweise aus. Von insgesamt 9.758 Fahrstreifenkilometern der Hauptfahrbahnen entfallen 6.398 km auf Asphalt- und 3.360 km auf Betonbauweise. Dies entspricht einem Verhältnis von rund 66 % zu 34 % und liegt damit in einer vergleichbaren Größenordnung zu der für die weitere Hochrechnung angenommenen Verteilung von 70 % Asphalt- und 30 % Betonbauweise [93]. Für die Schweizer Nationalstraßen wird in einer im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) erstellten Modellierung des Materialbestands ein Anteil von 90 % Asphalt- und 10 % Betonbauweise zugrunde gelegt [94]. Die verfügbaren Angaben für die D-A-CH-Region zeigen übereinstimmend einen überwiegenden Anteil der Asphaltbauweise. Die für die weitere Hochrechnung angesetzte Verteilung von 70 % Asphalt- und 30 % Betonbauweise wird daher als vereinfachende Modellannahme beibehalten.

Als Grundlage für die länderspezifische Hochrechnung werden die jeweiligen Längen der Autobahnnetze in Deutschland, Österreich und der Schweiz herangezogen. Die Betrachtung wird auf Autobahnen beschränkt, da sich das Projekt VoltaVia auf Großbaustellen beziehungsweise größere Infrastrukturprojekte im Straßenbau konzentriert. Diese Abgrenzung entspricht zugleich den in Abschnitt 2.6 untersuchten Referenzbaustellen, bei denen von einer 4+0-

Verkehrsführung ausgegangen wird. Bei dieser Verkehrsführung wird der Verkehr beider Fahrtrichtungen auf einer Richtungsfahrbahn geführt, während der gesamte Querschnitt der gegenüberliegenden Richtungsfahrbahn saniert werden kann.

Für die weitere Hochrechnung wird als Arbeitsannahme eine jährliche Sanierungsquote von rund 4 % des bestehenden Autobahnnetzes angesetzt. Dies entspricht rechnerisch einem mittleren Sanierungszyklus von 25 Jahren. Die Größenordnung wird anhand der in den D-A-CH-Ländern verwendeten Nutzungs- und Erhaltungsansätze plausibilisiert. Für Deutschland wird in den Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen (RStO) für die Dimensionierung von Straßenbefestigungen ein Nutzungszeitraum von 30 Jahren zugrunde gelegt [80]. Für einzelne Asphaltdeckschichten werden zugleich theoretische Nutzungsdauern von 16 Jahren für Splittmastixasphalt und 19 Jahren für Gussasphalt angegeben [95]. Für Österreich erfolgt die Erhaltungsplanung des Autobahn- und Schnellstraßennetzes durch die ASFINAG zustandsorientiert. Bei Asphaltbefestigungen fließen unter anderem das Alter der Deckschicht, Risse, Oberflächenschäden, Spurrinnen und Längsebenheit in die Bewertung ein, sodass kein allgemeingültiger zeitlicher Sanierungszyklus vorgegeben wird [93]. Für die Schweiz gibt das Bundesamt für Straßen (ASTRA) an, dass Deckschichten von Nationalstraßen in der Regel eine Lebensdauer von etwa 15 bis 20 Jahren aufweisen [96]. Die unterschiedlichen Angaben verdeutlichen, dass die tatsächlichen Sanierungsintervalle von Bauweise, Beanspruchung, Zustand und Eingriffstiefe abhängen und sich daraus keine einheitliche Sanierungsquote für die D-A-CH-Region ableiten lässt. Die angesetzte Quote von 4 % wird daher als vereinfachte länderübergreifende Arbeitsannahme verwendet. Für Asphaltfahrbahnen wird dabei die Deckensanierung als regelmäßig wiederkehrender Erhaltungsfall zugrunde gelegt. Grundhafte Sanierungen treten in größeren zeitlichen Abständen auf und weisen aufgrund des größeren Eingriffsumfangs einen höheren Energiebedarf auf. Sie werden in der vereinfachten Hochrechnung nicht gesondert gewichtet.

Aus den jeweiligen Autobahnnetzlängen werden zunächst die Richtungsfahrbahnkilometer abgeleitet. Unter Anwendung der angenommenen jährlichen Sanierungsquote wird anschließend bestimmt, wie viele Richtungsfahrbahnkilometer pro Jahr in den einzelnen D-A-CH-Ländern zu sanieren wären. Die zugrunde gelegten Netzlängen, die daraus abgeleiteten Richtungsfahrbahnkilometer und die jährlich zu sanierenden Streckenlängen sind in Tabelle 17 zusammengefasst.

*Tabelle 17: Netzstreckenlänge in der D-A-CH-Region (Schweiz: Streckenlänge der Autobahn gemäß erster Klasse nach Straßeneinteilung der ASTRA)*

| *Land* | *Netzlänge [km]* | *Richtungsfahrbahn-km [km]* | *Jährliche Sanierung [km]* |
|---|---|---|---|
| **Deutschland** | 13.217 [74] | 26.434 | 1.057 |
| **Österreich** | 2.288 [75] | 4.576 | 183 |
| **Schweiz** | 1.318 [81] | 2.636 | 105 |
| **D-A-CH-Region** | 16.823 | 33.646 | 1.346 |

Auf Grundlage dieser Größen wird eine Hochrechnung des Energiebedarfs vorgenommen, der bei einer Elektrifizierung der entsprechenden Sanierungsmaßnahmen entstehen würde. Die Berechnung dient dabei der Ermittlung einer plausiblen Größenordnung für den zukünftigen Energiebedarf im Autobahnbau. Sie stellt keine Prognose der tatsächlich jährlich durchgeführten Baumaßnahmen dar, sondern beschreibt ein einheitliches Szenario, mit dem die technischen Auswirkungen für Deutschland, Österreich und die Schweiz vergleichbar eingeordnet werden können.

### 4.1.2 Annahmen zu Fahrzeugflotte und Energieverbrauch

Für die Bestimmung des Energiebedarfs der eingesetzten Fahrzeuge und Baumaschinen wird ein zukünftiges Szenario betrachtet, in dem ein wesentlicher Teil der auf der Baustelle eingesetzten Flotte batterieelektrisch betrieben wird. Die zugrunde gelegte Fahrzeug- und Maschinenkonstellation besteht aus Referenzfahrzeugen, die im Rahmen des Projekts VoltaVia durch Markt- und Literaturrecherchen sowie durch Interviews mit Baumaschinenherstellern und Bauunternehmen identifiziert wurden.

Berücksichtigt werden die Fahrzeuge und Maschinen, die für die Durchführung einer grundhaften Sanierung einer Asphaltstraße erforderlich sind. Hierzu zählen sowohl die unmittelbar am Bauprozess beteiligten Baumaschinen als auch die für Materialtransporte und weitere unterstützende Tätigkeiten benötigten Fahrzeuge. Die für das Betrachtungsjahr 2040 angenommenen Antriebsarten der einzelnen Referenzfahrzeuge wurden aus der in Unterabschnitt 2.3.2 dargestellten Trendanalyse der Gerätetechnik übernommen. Damit wird berücksichtigt, welche Maschinengruppen nach der im Projekt erarbeiteten

Entwicklungsperspektive bis zu diesem Zeitpunkt voraussichtlich batterieelektrisch oder mit anderen alternativen Antriebssystemen verfügbar sein werden.

Die angenommenen Energieverbräuche der Fahrzeuge und Geräte beruhen auf den Berechnungen und Randbedingungen der in Abschnitt 2.6 untersuchten Praxisbeispiele. Als Referenz dient eine Deckensanierung mit Walzasphalt mit einer Länge von 7 km. Für die materialbezogenen Transportprozesse wird eine Entfernung von 30 km zwischen der Baustelle und dem Asphaltmischwerk angesetzt. Die vorgesehene Dauer der Baumaßnahme beträgt 130 Arbeitstage. Durch die Verwendung dieser einheitlichen Randbedingungen können die für die Referenzbaustelle ermittelten Energiebedarfe auf die jährlich zu sanierenden Autobahnabschnitte der einzelnen D-A-CH-Länder übertragen werden.

### 4.1.3 Jährlicher elektrischer Energiebedarf

Auf Basis der angenommenen Sanierungsquote von 4 % und der beschriebenen Referenzbaustelle wird der jährliche Energiebedarf für die Elektrifizierung der betrachteten Autobahnbaustellen berechnet. Hierzu wird der für eine 7 km lange Baumaßnahme ermittelte elektrische Energiebedarf auf die jeweils jährlich zu sanierende Streckenlänge in Deutschland, Österreich und der Schweiz hochgerechnet.

Die daraus resultierenden Werte beschreiben den zusätzlichen jährlichen Strombedarf, der sich ergeben würde, wenn die betrachteten Sanierungsmaßnahmen mit der für das Jahr 2040 angenommenen elektrifizierten Fahrzeug- und Maschinenflotte durchgeführt würden. Die Ergebnisse für die einzelnen D-A-CH-Länder sind in Tabelle 18 dargestellt.

*Tabelle 18: Energiebedarfe pro Jahr für elektrifizierte Baustellen*

| *Land* | *Baustellen-länge [km]* | *Strombedarf pro Baustelle [GWh]* | *Gesamtstrom-verbauch pro Jahr [GWh]* | *Anteiliger Stromver-brauch [%]* |
|---|---|---|---|---|
| **Referenz-Bau-stelle** | 7 | 0,23070 | | |
| **D-A-CH-Region** | 1.346 | 44,207 | 657.500 | 0,00672 |
| **Deutschland** | 1.057 | 34,741 | 529.000 [82] | 0,00657 |
| **Österreich** | 183 | 6,015 | 70.500 [83] | 0,00853 |
| **Schweiz** | 105 | 3,451 | 58.000 [84] | 0,00595 |

Die Hochrechnung zeigt, dass sich für die betrachteten Autobahnsanierungen in der D-A-CH-Region bei einer Sanierungsquote von 4 % ein zusätzlicher jährlicher Strombedarf von rund 44 GWh ergibt. Davon entfallen etwa 35 GWh auf Deutschland, 6 GWh auf Österreich und 3,5 GWh auf die Schweiz. Im Verhältnis zum jeweiligen nationalen Stromverbrauch ist dieser zusätzliche Energiebedarf mit rund 0,006 bis 0,009 % sehr gering. Auf Ebene des gesamten Energiesystems stellt die Elektrifizierung der betrachteten Baustellen damit keine relevante zusätzliche Strommenge dar. Entscheidend ist vielmehr, ob die benötigte Energie am jeweiligen Baustellenstandort zeitlich und leistungsmäßig verfügbar gemacht werden kann.

Zur Einordnung der ermittelten Größenordnung werden die zusätzlichen Energiebedarfe anschließend den jeweiligen nationalen Gesamtbedarfen an elektrischer Energie gegenübergestellt. Dadurch lässt sich abschätzen, welchen Anteil die Elektrifizierung der betrachteten Großbaustellen am gesamten Stromverbrauch der einzelnen Länder einnehmen würde. Diese Gegenüberstellung erlaubt jedoch zunächst nur eine energetische Betrachtung. Sie sagt noch nicht aus, ob die benötigte elektrische Energie am jeweiligen Baustellenstandort, im erforderlichen Zeitraum und mit der notwendigen Anschlussleistung zur Verfügung gestellt werden kann.

### 4.1.4 Leistungsbedarf

Neben dem jährlichen Energiebedarf ist daher der zeitlich auftretende Leistungsbedarf zu untersuchen. Für dessen Abschätzung wird angenommen, dass die batterieelektrischen Fahrzeuge und Maschinen während eines

achtstündigen Arbeitstages eingesetzt werden. Die verbleibenden 16 Stunden des Tages stehen grundsätzlich für das Wiederaufladen der Batteriesysteme zur Verfügung. Aus den täglichen Energieverbräuchen und den angenommenen Ladezeitfenstern werden die erforderlichen Ladeleistungen der einzelnen Fahrzeuge sowie der gesamten Baustellenflotte abgeleitet. Für die leistungsintensivste Bauphase resultiert daraus ein Nachladeleistungsbedarf von 378 kW.

Die berechneten Leistungen sind den potenziell verfügbaren Versorgungskapazitäten gegenüberzustellen. Hierzu gehören beispielsweise Netzanschlüsse und Ladeeinrichtungen an Rastanlagen, betriebliche Ladestandorte, mobile Batteriecontainer sowie wasserstoffbetriebene Brennstoffzellencontainer zur lokalen Stromerzeugung. Entscheidend ist dabei nicht allein die theoretische Nennleistung der jeweiligen Versorgungslösung. Ebenso sind die zeitliche Verfügbarkeit, mögliche Überschneidungen der Ladevorgänge bei mehreren gleichzeitig zu ladenden Fahrzeugen, die Auslastung bestehender Netzanschlüsse, die erforderlichen Sicherheits- und Aufstellflächen sowie die Integration der Versorgungssysteme in den Bauablauf zu berücksichtigen.

## 4.2 Auswirkungen auf die Baustellendurchführung (AP 4.1)

Die zuvor ermittelten zusätzlichen Strombedarfe umfassen sämtliche für die elektrifizierten Großbaustellen betrachteten Maschinen und Fahrzeuge. Diese Energiemenge muss jedoch nicht vollständig unmittelbar im Baustellenbereich bereitgestellt werden. Das zugrunde gelegte Energieversorgungs- und Logistikkonzept sowie die Zuordnung der Maschinen und Fahrzeuge zu den jeweiligen Lademöglichkeiten wurden bereits in Abschnitt 2.6 dargestellt.

Ein wesentlicher Teil der auf Großbaustellen eingesetzten Fahrzeuge entfällt auf straßengebundene Transportfahrzeuge, beispielsweise Kipper, Sattelzüge, Transportmischer oder Materialtransporte. Diese Fahrzeuge können grundsätzlich an Betriebshöfen, Produktions- und Logistikstandorten sowie an öffentlich zugänglicher Ladeinfrastruktur für schwere Nutzfahrzeuge geladen werden. Die im Aufbau befindlichen Lkw-Ladenetze beziehen damit grundsätzlich auch die auf Baustellen eingesetzten straßenzugelassenen Transportfahrzeuge ein. Deren Strombedarf ist zwar Bestandteil des zusätzlichen nationalen Energiebedarfs, muss aber nicht zwingend über die lokale Energieversorgung der Baustelle gedeckt werden.

Für die bereits dargestellte Versorgung der baustellengebundenen Maschinen mit transportablen Batteriespeichern ist dagegen zu klären, an welchem stationären Standort diese Speicher geladen werden können. Hierfür kommen insbesondere ein projektbezogener Netzanschluss, Ladeinfrastruktur entlang des

übergeordneten Straßennetzes sowie Betriebshöfe oder Niederlassungen der beteiligten Unternehmen infrage.

Bei mehrjährigen Großprojekten kann die Herstellung eines eigenen Anschlusses an das Mittelspannungsnetz zweckmäßig sein. Dies gilt insbesondere, wenn über einen längeren Zeitraum regelmäßig große Energiemengen benötigt werden und eine zentrale Baustelleneinrichtungs- oder Logistikfläche während mehrerer Bauphasen genutzt werden kann. Abhängig von der örtlichen Netzsituation können hierfür eine eigene Übergabe- und Transformatorstation, eine neue Zuleitung und gegebenenfalls eine Verstärkung des vorgelagerten Netzes erforderlich sein. Auswertungen von Interview-Partnern zur Lkw-Ladeinfrastruktur zeigen, dass leistungsfähige Netzanschlüsse frühzeitig geplant werden müssen und an einzelnen Standorten sogar ein Anschluss an die Hochspannungsebene erforderlich werden kann.

Bei kürzeren Maßnahmen, etwa Deckenerneuerungen oder abschnittsweisen Erhaltungsmaßnahmen, dürfte der Aufwand für einen neu herzustellenden leistungsfähigen Netzanschluss dagegen häufig nicht im Verhältnis zur begrenzten Nutzungsdauer stehen. In diesen Fällen ist vorrangig zu prüfen, ob vorhandene betriebliche oder externe Ladestandorte genutzt werden können. Eine pauschale Zuordnung anhand der Projektart ist jedoch nicht möglich; ausschlaggebend sind insbesondere Projektdauer, Energie- und Leistungsbedarf, Entfernung zu alternativen Ladestandorten sowie die örtliche Netzsituation.

Mit dem Ausbau der Lkw-Ladeinfrastruktur entstehen entlang der übergeordneten Straßennetze zunehmend Standorte mit leistungsfähigen Netzanschlüssen. In Deutschland ist ein Netz mit insgesamt rund 350 Standorten an bewirtschafteten und unbewirtschafteten Rastanlagen vorgesehen; für 124 unbewirtschaftete Rastanlagen wurden im Juli 2026 die Aufträge für Planung, Errichtung und Betrieb vergeben. Die Dimensionierung basiert ausdrücklich auf Analysen des erwarteten Ladebedarfs des Straßengüterverkehrs [85]. Österreich beabsichtigt, bis 2030 alle rund 60 ASFINAG-Rastplätze mit Ladeinfrastruktur auszustatten und stellt für erste Standorte bereits die notwendigen Stromanschlüsse her. Vorgesehen sind dabei ausdrücklich auch Schnelllade- und Megawatt-Lademöglichkeiten für Lkw [86]. In der Schweiz werden ebenfalls öffentlich zugängliche E-Lkw-Schnellladestandorte an ausgewählten Rastplätzen und Schwerverkehrskontrollzentren vorbereitet [87].

Diese Entwicklung verbessert grundsätzlich die räumliche Verfügbarkeit leistungsfähiger Stromanschlüsse entlang des Straßennetzes. Daraus kann jedoch nicht abgeleitet werden, dass an den Ladehubs zusätzliche Leistung für die Baustellenversorgung verfügbar sein wird. Die Anschlüsse werden auf den prognostizierten Bedarf des Schwerverkehrs ausgelegt und können mit zunehmender Zahl elektrischer Lkw entsprechend stark ausgelastet sein. Freie

Leistungsreserven für das Laden transportabler Baustellenspeicher dürfen daher nicht vorausgesetzt werden.

Eine Mitnutzung kann insbesondere dann infrage kommen, wenn die Baustellenspeicher zeitlich flexibel geladen und in ein Lastmanagement des Standortes eingebunden werden können. Sie setzt jedoch geeignete technische Schnittstellen, Aufstellflächen, Zugangsrechte sowie eine Vereinbarung mit dem Ladeinfrastrukturbetreiber voraus. Auch die öffentlich zugänglichen Fahrzeugladepunkte selbst sind nicht automatisch für das Laden von Batteriecontainern oder sonstigen mobilen Speichersystemen geeignet.

Betriebshöfe und Unternehmensstandorte stellen eine weitere mögliche Versorgungsquelle dar [88]. Das Laden auf betriebseigenen Flächen wird auch für schwere elektrische Nutzfahrzeuge als wesentlicher Bestandteil der zukünftigen Ladeinfrastruktur eingeordnet. Gleichzeitig muss die Leistungsfähigkeit des jeweiligen Netzanschlusses frühzeitig und standortbezogen geprüft werden. Der Ausbau eines zentralen betrieblichen Ladestandorts kann insbesondere bei wiederkehrenden Baustellen innerhalb einer Region zweckmäßiger sein als die wiederholte Herstellung temporärer Netzanschlüsse. Seine Eignung hängt jedoch zusätzlich von der Entfernung zur Baustelle und dem daraus entstehenden Transportaufwand für die mobilen Speicher ab.

Die konkrete stationäre Stromversorgung muss deshalb für jede Baumaßnahme projektspezifisch untersucht werden. Zu prüfen sind insbesondere:

- die benötigte Energiemenge und maximale Ladeleistung,
- die verfügbaren Ladezeiten und das Lastprofil,
- die Projektdauer und der zeitliche Verlauf des Bedarfs,
- mögliche Anschluss- und Ladestandorte,
- die dort tatsächlich verfügbare Netzleistung,
- notwendige Zuleitungen, Transformatoren oder Netzverstärkungen,
- die Entfernung zum Baufeld,
- Zugangs- und Nutzungsrechte sowie
- Planungs- und Realisierungszeiten.

Die räumliche Nähe einer Stromleitung, Rastanlage oder bestehenden Ladeeinrichtung allein erlaubt keine Aussage darüber, ob die benötigte Leistung auch tatsächlich und rechtzeitig zur Verfügung steht.

Aus diesen Rahmenbedingungen folgt als übergreifende technische Konsequenz, dass die für eine elektrifizierte Großbaustelle erforderliche Energieinfrastruktur in den meisten Fällen nicht als bereits vorhandene Standortressource vorausgesetzt werden kann. Vielmehr muss sie gemeinsam mit den Baumaschinen und den weiteren Baustelleneinrichtungen zur Baustelle gebracht, dort temporär aufgebaut oder im Rahmen längerfristiger Projekte eigens hergestellt werden. Die Energieversorgung wird damit zu einem eigenständigen Bestandteil der Baustelleneinrichtungs- und Ausführungsplanung.

Die in Abschnitt 2.6 entwickelten Infrastrukturkonzepte bilden hierfür eine Grundlage. Sie ermöglichen es, die erforderliche Energieversorgung in Abhängigkeit vom jeweiligen Energie- und Leistungsbedarf, der Projektdauer sowie den örtlichen Randbedingungen zusammenzustellen. Neben projektbezogenen Netzanschlüssen kommen insbesondere mobile und transportable Versorgungslösungen infrage, mit denen elektrische Energie zur Baustelle transportiert, zwischengespeichert und bedarfsgerecht an die Maschinen abgegeben werden kann.

Mobile Batteriecontainer mit den für derartige Anwendungen erforderlichen Energie- und Leistungsgrößen sind bereits am Markt verfügbar. Derartige Systeme können an einem geeigneten stationären Standort geladen, zur Baustelle transportiert und dort zur Versorgung der Maschinen oder zur Abdeckung von Leistungsspitzen eingesetzt werden. Ihre konkrete Dimensionierung und Anzahl sind jedoch stets auf das Lastprofil, die vorgesehenen Ladezeiten und den Bauablauf der jeweiligen Maßnahme abzustimmen. Die technische Umsetzung der Elektrifizierung erfordert somit eine integrierte Planung von Maschineneinsatz, Energieversorgung, Speicherlogistik und Baustellenbetrieb.

## 4.3 Wirtschaftliche und organisatorische Auswirkungen auf die Baufirmen (AP 4.1)

Die bereits in Abschnitt 3.3 dargestellte Vergabelogik ermöglicht durch das vorgesehene Bepunktungssystem eine schrittweise Einführung der Elektrifizierung. Bauunternehmen müssen ihren Fuhrpark dadurch nicht unmittelbar vollständig elektrifizieren, sondern können zunächst einzelne geeignete Maschinen und Fahrzeuge projektbezogen elektrisch einsetzen. Mit zunehmender Marktverfügbarkeit und verbesserten Möglichkeiten der Energieversorgung kann der geforderte Elektrifizierungsgrad schrittweise erhöht werden.

Voraussetzung für die Wirksamkeit dieses Ansatzes ist eine flächendeckende, konsequente und langfristig verlässliche Anwendung. Werden Elektrifizierungskriterien lediglich in einzelnen Pilotprojekten berücksichtigt und bei nachfolgenden Ausschreibungen nicht weiterverfolgt, entsteht für die Bauunternehmen

keine ausreichende Planungssicherheit. Investitionen in elektrische Maschinen, Ladeinfrastruktur und betriebliche Energieversorgung sind insbesondere dann wirtschaftlich darstellbar, wenn von einer dauerhaften und projektübergreifenden Nachfrage ausgegangen werden kann.

Erforderlich ist daher eine über einzelne Projekte hinausgehende politische und institutionelle Roadmap. Diese sollte das langfristig angestrebte Elektrifizierungsniveau, die schrittweise Weiterentwicklung der Anforderungen sowie die Zeitpunkte für die Einführung verbindlicher Mindestanforderungen festlegen. Gleichzeitig sollte transparent dargestellt werden, für welche Projektarten und Auftraggeber die jeweiligen Entwicklungsstufen gelten. Dadurch erhalten Bauunternehmen, Maschinenhersteller, Vermieter und Energieversorger eine verlässliche Grundlage für Investitionsentscheidungen, Beschaffungszyklen, Produktentwicklungen und den Ausbau der erforderlichen Ladeinfrastruktur.

In einer ersten Stufe wird die regelmäßige und flächendeckende Anwendung des zuvor dargelegten Bepunktungssystems empfohlen. Dieses ist auf Grundlage der gewonnenen Praxiserfahrungen, der technologischen Entwicklung sowie der Marktverfügbarkeit elektrifizierter Maschinen und geeigneter Energieversorgungslösungen regelmäßig zu evaluieren und fortzuschreiben. Dabei können insbesondere die Gewichtung des Elektrifizierungskriteriums, die Anforderungen an den Nachweis des elektrischen Einsatzes sowie die Bewertung unterschiedlicher Elektrifizierungsbeiträge angepasst werden.

Sobald eine hinreichende Marktreife erreicht ist, sollte das Bepunktungssystem durch eine verbindliche Mindestanforderung an den Elektrifizierungsgrad der jeweiligen Baumaßnahme ergänzt werden. Diese sollte funktional formuliert sein und einen projektbezogenen Mindestanteil elektrisch erbrachter Leistungen vorgeben, ohne die hierfür einzusetzenden Maschinen, Fahrzeuge oder technischen Lösungen abschließend festzulegen. Dadurch bleibt den Bietern die Möglichkeit erhalten, den geforderten Elektrifizierungsgrad unter Berücksichtigung des vorgesehenen Bauablaufs, der verfügbaren Maschinentechnik und der projektspezifischen Energieversorgung möglichst effizient zu erfüllen.

Elektrifizierungsleistungen, die über das verbindliche Mindestniveau hinausgehen, können während einer Übergangsphase weiterhin durch zusätzliche Wertungspunkte berücksichtigt werden. Mit zunehmender Marktverfügbarkeit und technischer Reife sollte der verbindliche Mindestanteil schrittweise angehoben und das ergänzende Bepunktungssystem entsprechend angepasst, reduziert oder langfristig ersetzt werden. Auf diese Weise kann die Elektrifizierung von einer zunächst anreizorientierten Förderung schrittweise in ein verbindliches Anforderungsniveau überführt werden, perspektivisch bis hin zu einer weitgehend oder vollständig elektrifizierten Leistungserbringung, soweit dies für die

jeweiligen Baumaßnahmen technisch, wirtschaftlich und betrieblich umsetzbar ist.

Die Elektrifizierung sollte somit nicht als isolierte Anforderung einzelner Baumaßnahmen verstanden werden, sondern als langfristige, einheitlich verfolgte und für die Marktteilnehmer planbare Entwicklung des Straßenbausektors. Nur durch diese können wirtschaftliche Belastungen in Folge der Elektrifizierung für die Bauunternehmen abgeschwächt werden.

## 4.4 Bezugnahme zum Status Quo und Bewertung der Auswirkungen (AP 4.2)

Die Elektrifizierung des Straßenbaus ist bislang noch nicht als reguläre Ausführungspraxis etabliert. Der Einsatz elektrischer Technik konzentriert sich gegenwärtig überwiegend auf Kleingeräte, einzelne kleinere Baumaschinen sowie Pilot- und Demonstrationsvorhaben. Auf großen Straßenbaustellen mit leistungsintensiven Maschinen, hohen Tagesleistungen und umfangreichen Transportprozessen findet eine weitgehende Elektrifizierung bislang nur in Einzelfällen statt.

Eine wesentliche Ursache hierfür liegt im Zusammenwirken der derzeit noch höheren Kosten elektrifizierter Maschinen- und Versorgungskonzepte mit der überwiegend preisorientierten Vergabepraxis. Solange elektrifizierte Ausführungskonzepte gegenüber konventionellen Lösungen mit zusätzlichen Anschaffungs-, Bereitstellungs- oder Versorgungskosten verbunden sind und die damit erzielbaren Emissionsminderungen bei der Zuschlagsentscheidung nicht angemessen berücksichtigt werden, entstehen für entsprechende Angebote wirtschaftliche Wettbewerbsnachteile. Für Bauunternehmen besteht unter diesen Bedingungen nur ein begrenzter Anreiz, elektrische Maschinen einzusetzen, zu beschaffen oder entsprechende Ausführungskonzepte anzubieten.

Die daraus resultierende geringe und nicht verlässlich planbare Nachfrage begrenzt zugleich die Absatzperspektiven für Hersteller und Vermieter. Elektrische Großmaschinen werden daher bislang nur in vergleichsweise geringen Stückzahlen angeboten und bereitgestellt, wodurch Skaleneffekte, Standardisierung und damit verbundene Kostensenkungen nur eingeschränkt erreicht werden. Mit zunehmender und langfristig verlässlicher Nachfrage ist jedoch davon auszugehen, dass sich die Marktverfügbarkeit verbessert und die derzeitige Kostendifferenz gegenüber konventionellen Lösungen verringert.

Die vorangegangenen technischen, wirtschaftlichen und organisatorischen Untersuchungen zeigen, dass eine schrittweise Elektrifizierung großer Straßenbaustellen grundsätzlich realisierbar ist. Der daraus resultierende zusätzliche

Strombedarf erscheint auf nationaler Ebene beherrschbar, während die konkrete Bereitstellung der erforderlichen Energie und Anschlussleistung projekt- und standortspezifisch zu planen ist. Für die Überführung in die reguläre Straßenbaupraxis sind daher langfristig verlässliche und projektübergreifend angewendete Vergaberahmenbedingungen erforderlich. Erst ein kontinuierlicher Entwicklungspfad schafft die notwendige Planungssicherheit für Investitionen in Maschinen, Produktionskapazitäten und Energieversorgungslösungen und ermöglicht damit perspektivisch eine wirtschaftlich wettbewerbsfähige Elektrifizierung.

# 5 Zusammenfassung

Das Forschungsprojekt VoltaVia untersuchte, in welchem Umfang sich große Straßenbaustellen bereits heute und perspektivisch mit elektrifizierten Baumaschinen realisieren lassen. Den verschiedenen für die Straßeninfrastruktur verantwortlichen Akteuren soll aufgezeigt werden, wie eine auf erneuerbaren Energieträgern basierende Elektrifizierung von Großbaustellen im Straßenbau organisiert werden könnte, welche Entscheidungen bei der Vorbereitung von Ausschreibungen für Großprojekte in diesem Zusammenhang zu treffen sind, und welche Auswirkungen dies auf die Straßenbaubranche hätte.

Hierzu wurden technische, energetische, wirtschaftliche, organisatorische und vergabebezogene Aspekte in einem integrierten Untersuchungsansatz zusammengeführt. Betrachtet wurden die grundhafte Sanierung sowie die Deckensanierung von Asphalt- und Betonfahrbahnen. Für die jeweiligen Szenarien wurden die erforderlichen Bauprozesse und Baumaschinen erfasst, die zugehörigen Energie- und Leistungsbedarfe bestimmt und geeignete Maschinen- und Energieversorgungskonzepte für die Betrachtungsjahre 2027, 2040 und 2050 entwickelt. Auf dieser Grundlage konnten übertragbare Referenzkonzepte für wiederkehrende Sanierungsmaßnahmen abgeleitet werden. Ihre Anwendung erfordert jedoch stets eine projektspezifische Anpassung an das jeweilige Bauverfahren, die eingesetzte Maschinenkonstellation, die angestrebte Tagesleistung, die geplante Bauzeit sowie die örtlichen und logistischen Rahmenbedingungen.

**Technische Elektrifizierbarkeit der Bauprozesse**

Die Untersuchung zeigt, dass für bis zu 86 % der in den betrachteten Bauprozessen benötigten Maschinenklassen bereits heute elektrifizierte Modelle am Markt verfügbar sind (Abbildung 12). Ein wesentlicher Teil der untersuchten Straßenbauprozesse könnte daher grundsätzlich bereits mit elektrifizierten Maschinen ausgeführt werden. Die marktseitige Verfügbarkeit darf jedoch nicht mit einer vollständigen technischen und betrieblichen Gleichwertigkeit gegenüber dieselbetriebenen Maschinen gleichgesetzt werden. Insbesondere hinsichtlich Dauerleistung, Betriebsdauer, Ladebedarf, Einsatzflexibilität und Verfügbarkeit bestehen teilweise noch Einschränkungen. Angebotslücken bestehen vor allem bei spezialisierten und besonders leistungsintensiven Maschinen. Dies betrifft insbesondere Beschicker und Gleitschalungsfertiger. Insgesamt bestätigen die Ergebnisse jedoch, dass eine weitgehende Elektrifizierung großer Straßenbaustellen unter den betrachteten Rahmenbedingungen bereits heute technisch grundsätzlich möglich ist. Voraussetzung ist, dass Maschinenwahl, Energieversorgung, Ladeprozesse, Logistik und Bauablauf aufeinander abgestimmt werden.

### Energieversorgung als zentrale Herausforderung

Als wesentliche technische und organisatorische Herausforderung wurde die bedarfsgerechte Energieversorgung auf dem Baufeld identifiziert. Straßenbaustellen verfügen in der Regel nicht über Netzanschlüsse, die eine unmittelbare Versorgung leistungsintensiver elektrifizierter Baumaschinen ermöglichen. Bei mehrjährigen Großprojekten kann die Herstellung eines projektbezogenen Mittelspannungsanschlusses grundsätzlich eine geeignete Lösung darstellen. Dessen technische und wirtschaftliche Umsetzbarkeit hängt insbesondere von folgenden Faktoren ab: Die örtliche Netzsituation, verfügbare Anschlussleistung, der erforderliche Planungs- und Genehmigungsvorlauf, die benötigte Leistungs- und Energiemenge, die Projektdauer sowie den Kosten für Errichtung, Betrieb und Rückbau. Für kürzere oder räumlich wandernde Baumaßnahmen sind dagegen vorrangig temporäre und mobile Versorgungssysteme erforderlich, auf welche sich das Projekt fokussiert hat.

### Mobiles Energieversorgungskonzept

Für die untersuchten Szenarien wurde zunächst analysiert, an welchen Standorten die eingesetzten Baumaschinen und Fahrzeuge mit elektrischer Energie versorgt werden können. Auf Grundlage der räumlichen und betrieblichen Anforderungen wurden drei Versorgungskategorien unterschieden:

- **Baustellengebundene Maschinen**, die unmittelbar auf dem Baufeld betrieben und geladen werden müssen
- **Baumaschinen und Fahrzeuge**, die in einem gesonderten Ladebereich in unmittelbarer Nähe des Baufeldes geladen werden können
- **Mobile Fahrzeuge**, die aufgrund ihrer Reichweite und ihres Einsatzprofils weiter entfernte Ladeinfrastruktur nutzen können, beispielsweise Betriebshöfe, öffentliche Ladepunkte oder Rastanlagen

Insbesondere für Fahrzeuge und Maschinen der ersten Kategorie, wird ein Konzept zur lokalen Energiebereitstellung benötigt. Um dieses Konzept spezifisch für jedes Bauvorhaben aufstellen zu können, wurden im Projekt VoltaVia eine Reihe an Versorgungsoptionen vorgestellt und analysiert. Die Auswahl der optimalen Versorgungsoptionen hängt direkt vom vorhandenen oder geplanten Maschinenpark und den jeweiligen Antriebstechnologien und Energieverbräuchen ab. Die Elektrifizierung ist folglich nicht ausschließlich als Austausch der Antriebstechnologie zu verstehen. Sie erfordert vielmehr ein integriertes Maschinen-, Energie-, Logistik- und Betriebskonzept. Die Energieplanung wird damit zu einem zentralen Bestandteil der Arbeitsvorbereitung und Bauablaufplanung. Neben dem Modell zur Berechnung der notwendigen Energiemengen je Energieträger wurde daher ein Ablaufplan zur Plausibilisierung der

Fahrzeugauswahl erstellt, mit dessen Hilfe die Umsetzbarkeit der Energieversorgung auf der Baustelle systematisch bewertet werden kann. Dabei werden insbesondere auch die erforderlichen Aufstell- und Bewegungsflächen, deren Zufahrts- und Transportmöglichkeiten, einzuhaltende Sicherheits- und Schutzabstände, vorhandene elektrische Anschlussmöglichkeiten, Konzepte zur Bereitstellung und Lagerung des Wasserstoffs, Anforderungen an Betrieb, Überwachung und Instandhaltung sowie Genehmigungs-, Brand- und Arbeitsschutzanforderungen betrachtet. Zusätzlich findet auch eine Gleichzeitigkeitsbetrachtung statt, um die maximal auftretenden Lasten zeitlich aufzulösen und somit mögliche sich überlagernde Energieanforderungen aufzusummieren. Sollte die Plausibilisierung der Energieversorgung negativ ausfallen, so muss eine Neuplanung des Fahrzeugparks unter Ausschluss der nicht plausiblen Antriebsart erfolgen. Bei positiver Bewertung kann das System grundsätzlich umgesetzt werden und der Gesamtenergiebedarf der Baustelle kann gedeckt werden.

**Wirtschaftliche Rahmenbedingungen**

Ein weiteres Hemmnis bilden die derzeitigen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen. Elektrifizierte Baumaschinen weisen häufig höhere Investitionskosten als vergleichbare konventionelle Maschinen auf. Ein Teil dieser Mehrkosten kann über die Nutzungsdauer durch höhere energetische Wirkungsgrade sowie geringere Energie-, Wartungs- und Instandhaltungskosten kompensiert werden. Ob und innerhalb welchen Zeitraums eine Amortisation erreicht wird, hängt insbesondere von der Auslastung und jährlichen Betriebsstunden, der Nutzungs- und Abschreibungsdauer, dem jeweiligen Einsatzprofil und Leistungsanforderungen, örtlichen Energiepreisen und deren Entwicklung, Investitionen in Lade- und Versorgungsinfrastruktur, anfallenden Wartungs- und Instandhaltungskosten, Restwert der Maschinen und Batteriesysteme nach deren Gebrauchsdauer sowie möglichen Auswirkungen auf Produktivität, Tagesleistung und Bauzeit ab. Für eine belastbare wirtschaftliche Bewertung ist daher eine Gesamtkostenbetrachtung erforderlich.

**Nachfrage, Marktverfügbarkeit und Investitionshemmnisse**

Die bislang geringe Nachfrage nach elektrifizierten Baumaschinen und deren noch überwiegend projektbezogener oder sporadischer Einsatz lassen sich im Wesentlichen auf zwei miteinander verbundene Faktoren zurückführen. Erstens werden elektrifizierte beziehungsweise emissionsärmere Baumaschinen in Ausschreibungen bislang nur selten verbindlich gefordert oder bei der Angebotsbewertung angemessen berücksichtigt. Bauunternehmen haben daher nur einen begrenzten wirtschaftlichen Anreiz, in die gegenwärtig häufig noch teureren Maschinen zu investieren. Dies gilt insbesondere dann, wenn eine kontinuierliche Auslastung der Maschinen nicht verlässlich absehbar ist und die erforderliche Energie- und Ladeinfrastruktur nicht flächendeckend zur Verfügung

steht. Zweitens können Maschinenhersteller und Anbieter von Versorgungssystemen Entwicklung, Industrialisierung, Serienproduktion und Kostensenkung nur dann verstärkt vorantreiben, wenn eine ausreichend große und planbare Nachfrage besteht. Daraus ergibt sich ein wechselseitiges Abhängigkeitsverhältnis: Eine geringe Nachfrage begrenzt das Angebot und hält die Kosten hoch, während eine eingeschränkte Marktverfügbarkeit und hohe Kosten wiederum die Nachfrage hemmen. Somit haben gezielte Ausschreibungen und Vergaberichtlinien direkten Einfluss auf den Markthochlauf elektrifizierter Baumaschinen.

**Überführung in Ausschreibung und Vergabe**

Ein zentraler Schwerpunkt des Projektes lag auf der Überführung der technischen und energetischen Erkenntnisse in die Ausschreibungs- und Vergabepraxis. Hierzu wurde ein technologieoffener und anreizorientierter Bewertungsansatz entwickelt. Bieter sollen einen Wertungsvorteil erhalten, wenn ihr Maschinen- und Energieversorgungskonzept gegenüber einem konventionellen Referenzszenario geringere betriebsbedingte lokale $CO_2$-Emissionen verursacht. Dabei wird nicht die nachgewiesene Emissionsminderung bewertet, sondern der Einsatz einer nachweislich emissionsärmerer Antriebstechnologie. Dies lässt sich in der Vergabepraxis einfacher anwenden und überprüfen. Der Ansatz ist zunächst als Zuschlagskriterium und nicht als Ausschlusskriterium vorgesehen. Bieter, die aufgrund der Marktverfügbarkeit oder projektspezifischer Anforderungen keine oder nur einzelne emissionsärmere Maschinen einsetzen können, werden daher nicht grundsätzlich ausgeschlossen. Zugleich entsteht ein wirtschaftlicher Anreiz, den Anteil emissionsärmerer Maschinen und Versorgungslösungen schrittweise zu erhöhen. Gleichzeitig wird der zusätzliche administrative Aufwand begrenzt, da kein umfassendes, projektspezifisches $CO_2$-Reporting durch die Bieter erforderlich ist. Die Bewertung erfolgt stattdessen anhand vorab definierter, einheitlicher und überprüfbarer maschinenspezifischer Kriterien. Auf dieser Grundlage können vollelektrische Maschinen, Hybridlösungen und weitere emissionsärmere Antriebskonzepte sowie elektronische Steuerungs- und Assistenzsysteme zur Steigerung der Energie- und Betriebseffizienz berücksichtigt werden.

**Elektrifizierungsindex**

Zur praktischen Umsetzung der Bewertungslogik wurde im Projekt ein Elektrifizierungsindex entwickelt. Dieser berücksichtigt neben der Antriebs- beziehungsweise Emissionscharakteristik auch die Anzahl und die prozessbezogene Relevanz der eingesetzten Baumaschinen. Damit wird nicht nur der Einsatz einzelner elektrifizierter Maschinen, sondern das Maschinenkonzept in seiner Gesamtheit bewertet. Zugleich wird vermieden, dass die Elektrifizierung einer größeren Zahl kleiner oder für den Bauprozess weniger relevanter Maschinen

das Bewertungsergebnis unverhältnismäßig beeinflusst. Für die Einführung des Indexes wird ein stufenweises Vorgehen vorgeschlagen. Beginnend mit einer Einführungsphase in welcher der Elektrifizierungsindex zunächst als Bonifizierung emissionsärmerer Angebote eingesetzt wird, kann dieser in der Übergangsphase mit zunehmender Marktverfügbarkeit und wachsender Praxiserfahrung stärker gewichtet werden und abschließend in der Etablierungsphase als verbindlicher Mindestwert übernommen und schrittweise angehoben werden. Auftraggeber erhalten damit ein Instrument, mit dem sie bereits heute Anreize für emissionsärmere Maschinen- und Versorgungskonzepte schaffen können, ohne bestimmte Antriebstechnologien verbindlich vorzugeben. Gleichzeitig lässt sich das Anspruchsniveau schrittweise an die technische und marktseitige Entwicklung anpassen.

**Politische Rahmenbedingungen und Markthochlauf**

Für einen erfolgreichen Markthochlauf sind klare, langfristig verlässliche und für die Marktakteure nachvollziehbare politische Rahmenbedingungen erforderlich. Die öffentliche Hand definiert die klima- und nachhaltigkeitspolitischen Zielsetzungen und ist zugleich ein wesentlicher Auftraggeber im Straßenbau. Ihr kommt daher eine zentrale Rolle bei der Entwicklung der Nachfrage zu. Frühzeitig angekündigte und schrittweise steigende Anforderungen können Bauunternehmen, Maschinenherstellern und Anbietern von Energieversorgungssystemen die erforderliche Planungssicherheit geben. Ein solcher Entwicklungspfad sollte weder einzelne Technologien noch bestimmte Maschinengruppen vorschreiben. Stattdessen sollten überprüfbare Zielgrößen für die Minderung baustellenbezogener $CO_2$-Emissionen oder für den zunehmenden Anteil emissionsarmer Bauprozesse definiert werden. Nur wenn eine ausreichend große und dauerhaft absehbare Nachfrage entsteht, ist davon auszugehen, dass die beteiligten Marktakteure verstärkt in die Emissionsminderung investieren.

**Auswirkungen auf Energiebedarf und Branchenstrukturen**

Die Elektrifizierung großer Straßenbaustellen verändert nicht nur den Maschinenbetrieb, sondern auch die Energieversorgung und die betrieblichen Strukturen der Baubranche. Der Energiebedarf verlagert sich schrittweise von fossilen Kraftstoffen hin zu elektrischer Energie und perspektivisch zu erneuerbar erzeugtem Wasserstoff. Damit gewinnen Energieplanung, Versorgungslogistik und Lastmanagement zunehmend an Bedeutung. Diese Aufgaben müssen künftig enger mit Arbeitsvorbereitung, Maschinenplanung, Baustelleneinrichtung und Bauablaufplanung verknüpft werden. Die im Projekt durchgeführte Hochrechnung zeigt, dass die Elektrifizierung großer Straßenbaustellen zwar zu einem zusätzlichen Strombedarf führt, dieser auf nationaler Ebene jedoch grundsätzlich beherrschbar erscheint. Die maßgebliche Herausforderung

besteht weniger in der insgesamt benötigten Energiemenge als in deren lokaler, zeitgerechter und leistungsadäquater Bereitstellung.

**Einordnung der ökologischen Wirkungen**

Die ökologische Bewertung darf sich nicht ausschließlich auf die lokalen Emissionen während des Maschinenbetriebs beschränken. Für eine umfassende Bewertung sind auch die vorgelagerten und nachgelagerten Lebenszyklusphasen der Maschinen und Versorgungseinrichtungen zu berücksichtigen. Darüber hinaus verursachen Baumaschinen und Energieversorgung nur einen Teil der gesamten Emissionen eines Straßenbauprojekts. Für eine ganzheitliche Bewertung sind deshalb auch die Baustoffherstellung, Materialtransporte, der Bauprozess selbst sowie weitere Lebenszyklusphasen der Infrastruktur einzubeziehen. Der im Projekt entwickelte Ansatz zur Bewertung der Baustellenemissionen stellt somit einen wichtigen Bestandteil einer umfassenden ökologischen Betrachtung dar, ersetzt jedoch keine vollständige Lebenszyklusanalyse des gesamten Straßenbauprojekts.

**Implementierung in die Straßenbaupraxis**

Mit den entwickelten Maschinen-, Energieversorgungs- und Bewertungsansätzen liegen konkrete Grundlagen für den Einsatz elektrifizierter Baumaschinen in regulären Straßenbauprojekten vor. Öffentliche Auftraggeber sind aufgerufen, die entwickelten Instrumente bei geeigneten Straßenbaumaßnahmen anzuwenden und emissionsärmere Maschinen- und Energieversorgungskonzepte schrittweise in den regulären Beschaffungsprozess zu überführen. Der Elektrifizierungsindex kann dabei zunächst als Zuschlagskriterium eingesetzt werden, um emissionsärmere Angebote zu honorieren, ohne Bieter mit konventionellen Maschinenkonzepten grundsätzlich vom Vergabeverfahren auszuschließen. Die Anwendung sollte nicht auf gesonderte Demonstrationsprojekte beschränkt bleiben, sondern im Rahmen geeigneter, regulär ausgeschriebener Straßenbaumaßnahmen erfolgen. Dabei können die entwickelten Ansätze zunächst projektspezifisch eingesetzt und mit zunehmender Praxiserfahrung vereinheitlicht werden. Eine frühzeitige Implementierung schafft Nachfrage, erhöht die Planungssicherheit für Bauunternehmen, Maschinenhersteller und Anbieter von Energieversorgungssystemen und unterstützt den Aufbau der erforderlichen Markt- und Versorgungsstrukturen. Gleichzeitig ermöglicht die systematische Erfassung der Umsetzungserfahrungen, die Bewertungsmaßstäbe und technischen Anforderungen kontinuierlich weiterzuentwickeln. Die Voraussetzungen für den Einstieg in die praktische Anwendung sind damit grundsätzlich gegeben. Entscheidend ist nun, die entwickelten Ansätze in konkrete Ausschreibungen zu überführen, geeignete Anreize zu setzen und die Elektrifizierung schrittweise als festen Bestandteil der Straßenbaupraxis zu etablieren.

# 6 Verzeichnisse

## 6.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Treffen des Projektteams und Beiratsmitglieder auf der Branchen Messe BAUMA in München 2025 (zu sehen sind Vertreterinnen und Vertreter der Autobahn GmbH, BASt, RWTH Aachen und Zeppelin Rental). 8
Abbildung 2: Forschungsansatz und methodischen Vorgehen 10
Abbildung 3: Konzeptionelles Vorgehen der Literaturrecherche (in Anlehnung an Brocke et al. [1] und Webster et al. [2]) 11
Abbildung 4: Fünf Schritte für eine systematische Literaturrecherche (Darstellung, RWTH Aachen) 13
*Abbildung 5: Übersicht der Top-Themen je Wirtschaftsregion nach Häufigkeit der Nennung [3] bis [67]* 14
Abbildung 6: Übersicht der Nennung von Schlagwörtern innerhalb der Fachliteratur [3] bis [67] 16
Abbildung 7: Weiterführende Erkenntnisse aus der Analyse. 20
Abbildung 8: Übersicht der Herangehensweise bei den Interviews mit Straßenbauunternehmen 24
Abbildung 9: Übersicht der Herangehensweise bei den Herstellerinterviews 25
Abbildung 10: Kombinatorischer Ansatz zur Voraussage zukünftiger Trends 31
Abbildung 11: Die Trendanalyse baut auf dem Stand der Technik auf 33
Abbildung 12: Einordnung der eingesetzten Maschinen und Fahrzeuge nach verfügbarer Antriebstechnologie für das Betrachtungsjahr 2027 (eigene Darstellung, basierend auf den Herstellerinterviews und der Marktrecherche). 34
Abbildung 13a: Die Herleitung und Ergebnisse der Trendanalyse wurden in einer Excel dokumentiert 35
Abbildung 14:Validierung der Ergebnisse aus der Methodik 36
Abbildung 15: Drei Arten von Baustellen müssen unterschieden werden 39
Abbildung 16: Bauphasen in Abhängigkeit von Maßnahmentyp und Bauweise. Auf dieser Grundlage können Maschinen und Fahrzeuge den jeweiligen Prozessen zugeordnet und die daraus resultierenden Anforderungen an Energieversorgung und Infrastruktur abgeleitet werden. 40
Abbildung 17: Beispiel: Abhängig von der Baustellenart und dem Referenzjahr werden Energiebedarfe bestimmt. 1)[89] 41
*Abbildung 18: In der Theorie existiert eine Vielzahl an Infrastrukturkonzepten, die beliebig kombinierbar sind.* 42
Abbildung 19: Katalog auf Basis der Konzepte und Kriterien 44

Abbildung 20: Betrachtungsumfang Grundhafte Sanierung einer Asphaltstraße ..... 52
Abbildung 21: Betrachtungsumfang Grundhafte Sanierung einer Betonstraße ..... 52
Abbildung 22: Betrachtungsumfang Deckensanierung einer Asphaltstraße... 52
Abbildung 23: Übersicht der Bewertungsfälle nach Sanierungsszenario und Zeithorizont. ..... 53
Abbildung 24: Einordnung der eingesetzten Maschinen und Fahrzeuge nach verfügbarer Antriebstechnologie für das Betrachtungsjahr 2027 (eigene Darstellung) ..... 55
Abbildung 25: Erforderliche Energieversorgung auf Grundlage des maximalen täglichen Energiebedarfs für die grundhafte Sanierung einer Asphaltstraße mit Walzasphalt. ..... 56
Abbildung 26: Schematische Anordnung von Lade- und Betankungsbereichen innerhalb eines Autobahn-Baustellenbereichs mit 4+0-Verkehrsführung (eigene Darstellung) ..... 59
Abbildung 27: Alternative Möglichkeit: Installation der Ladeinfrastruktur auf einem gesperrten PWC (eigene Darstellung) ..... 60
Abbildung 28: Zuordnung der Energiebedarfe für die Jahre 2027, 2040 und 2050 nach Versorgungsbereich für die grundhafte Sanierung einer Asphaltstraße mit Walzasphalt. ..... 61
Abbildung 29: Einfluss der Betriebsweise auf Effizienz, Lebensdauer und Wirtschaftlichkeit eines Brennstoffzellengenerators. ..... 62
Abbildung 30: Beispielhafte Anwendung eines mobilen Batteriespeichersystems zur Versorgung elektrischer Baumaschinen. ..... 63
Abbildung 31: Mobile Batteriespeichersysteme als Kopplungselement zwischen Stromquellen und Verbrauchern auf der Baustelle (AC: Wechselstrom; DC: Gleichstrom; FC: Brennstoffzelle). ..... 63
Abbildung 32: Beispielhafter Aufbau eines containerisierten mobilen Batteriespeichersystems (Darstellung der RWTH Aachen). ..... 64
Abbildung 33: Beispielhafte Darstellung der Energieversorgung auf der Baustelle in einem gesonderten dafür vorgesehenen Bereich (eigene Darstellung) ..... 65
Abbildung 34: Speicherzustände der Batteriespeicher im Tagesverlauf für die Betrachtungsjahre 2027, 2040 und 2050 für die grundhafte Sanierung einer Asphaltstraße mit Walzasphalt. ..... 66
Abbildung 35: Darstellung: Beispielhafte Anordnung der temporären Energieversorgung inklusive Abmessungen (schematische Darstellung, nicht maßstäblich); (eigene Darstellung) ..... 68
Abbildung 36: Beispielhafte Darstellung für Anordnung der temporären Infrastruktur und Fahrzeuge auf einer Straßenbaustelle (eigene Darstellung) ..... 69

Abbildung 37: Erforderliche Energieversorgung auf Grundlage des maximalen täglichen Energiebedarfs für die grundhafte Sanierung einer Asphaltstraße mit Gussasphalt. ....70
Abbildung 38: Zuordnung der Energiebedarfe für die Jahre 2027, 2040 und 2050 nach Versorgungsbereich für die grundhafte Sanierung einer Asphaltstraße mit Gussasphalt. ....71
Abbildung 39: Speicherzustände der Batteriespeicher im Tagesverlauf für die Betrachtungsjahre 2027, 2040 und 2050 für die grundhafte Sanierung einer Asphaltstraße mit Gussasphalt. ....71
Abbildung 40: Erforderliche Energieversorgung auf Grundlage des maximalen täglichen Energiebedarfs für die grundhafte Sanierung einer Betonstraße. ....73
Abbildung 41: Zuordnung der Energiebedarfe für die Jahre 2027, 2040 und 2050 nach Versorgungsbereich für die grundhafte Sanierung einer Betonstraße. ....73
Abbildung 42: Speicherzustände der Batteriespeicher im Tagesverlauf für die Betrachtungsjahre 2027, 2040 und 2050 für die grundhafte Sanierung einer Betonstraße. ....74
Abbildung 43: Erforderliche Energieversorgung auf Grundlage des maximalen täglichen Energiebedarfs für die Deckensanierung einer Asphaltstraße mit Walzasphalt. ....75
Abbildung 44: Zuordnung der Energiebedarfe für die Jahre 2027, 2040 und 2050 nach Versorgungsbereich für die Deckensanierung einer Asphaltstraße mit Walzasphalt. ....76
Abbildung 45: Speicherzustände der Batteriespeicher im Tagesverlauf für die Betrachtungsjahre 2027, 2040 und 2050 für die Deckensanierung einer Asphaltstraße mit Walzasphalt. ....76
Abbildung 46: Erforderliche Energieversorgung auf Grundlage des maximalen täglichen Energiebedarfs für die Deckensanierung einer Asphaltstraße mit Gussasphalt. ....78
Abbildung 47: Zuordnung der Energiebedarfe für die Jahre 2027, 2040 und 2050 nach Versorgungsbereich für die Deckensanierung einer Asphaltstraße mit Gussasphalt. ....78
Abbildung 48: Speicherzustände der Batteriespeicher im Tagesverlauf für die Betrachtungsjahre 2027, 2040 und 2050 für die Deckensanierung einer Asphaltstraße mit Gussasphalt. ....79
Abbildung 49: Entwicklung der Betriebskosten im Vergleich zur konventionellen Herstellung. ....80
Abbildung 50: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Vergleich zur konventionellen Herstellung. ....81
Abbildung 51: Arten der Vergabeverfahren ....84
Abbildung 52: Übersicht Vergabekriterien ....89
Abbildung 53: Einführung des Typfaktors ....95

Abbildung 54: Einführung des Relevanzfaktors ..... 96
Abbildung 55: Einführung des Antriebsfaktors ..... 97
Abbildung 56: Differenzierung der Hybridantriebe ..... 98
Abbildung 57: Berücksichtigung von ressourcensparenden Technologien ..... 99
Abbildung 58: Abwägung der möglichen Faktoren des Nachhaltigkeitspunktesystems ..... 99
Abbildung 59: Berechnung des Anrechnungsfaktors ..... 101
Abbildung 60: Berechnung des Wertungspreises für den Angebotsvergleich ..... 102
Abbildung 61: Bepunktung eines Fahrzeugs nach der definierten Systematik ..... 111
Abbildung 62: Zweistufiges System zur Integration von Elektrifizierungs-Kriterien im Vergabeverfahren ..... 112

## 6.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der regionalen Forschungsschwerpunkte [3] bis [67] .... 15
Tabelle 2: Übersicht Teilnehmer an Experteninterviews ..... 23
Tabelle 3: Einordnung der Interviews mit Straßenbauunternehmen & Baumaschinenherstellern ..... 29
Tabelle 4: Methodik zur Bestimmung der Elektrifizierungs-Priorität von Gerätschaften im Straßenbau; Angelehnt an Abul Masrur [68]; 1) Faktoren für das Angleichen der stark variierenden Wertebereiche, um die Gewichtung der Parameter zu vereinheitlichen ..... 32
Tabelle 5: Ergebnisse der Trendanalyse ..... 37
Tabelle 6: Ableitung der Entwicklung der Energiebedarfe ..... 42
Tabelle 7: Energiebedarfe nach Sanierungsszenario, Betrachtungsjahr und Energieträger ..... 53
Tabelle 8: Energiebedarf des Szenarios der grundhaften Sanierung einer Asphaltstraße mit Walzasphalt differenziert nach Betrachtungsjahr und Energieträger ..... 56
Tabelle 9: Energiebedarf des Szenarios der grundhaften Sanierung einer Asphaltstraße mit Gussasphalt differenziert nach Betrachtungsjahr und Energieträger ..... 70
Tabelle 10: Energiebedarf des Szenarios der grundhaften Sanierung einer Betonstraße differenziert nach Betrachtungsjahr und Energieträger ..... 72
Tabelle 11: Energiebedarf des Szenarios der Deckensanierung einer Asphaltstraße mit Walzasphalt differenziert nach Betrachtungsjahr und Energieträger ..... 75
Tabelle 12: Energiebedarf des Szenarios der Deckensanierung einer Asphaltstraße mit Gussasphalt differenziert nach Betrachtungsjahr und Energieträger ..... 77
Tabelle 13: Kalibrierung des Typfaktors anhand der Referenzfahrzeuge .... 105
Tabelle 14: Zuordnung der Fahrzeugtypen zu den Flottenkategorien ..... 106
Tabelle 15: Kalibrierung des Relevanzfaktors anhand der Sanierungsszenarien (für die weiterführende Berechnung, siehe Anhang 4) ..... 107
Tabelle 16: Belegung des Antriebsfaktors nach Antriebstyp ..... 109
Tabelle 17: Netzstreckenlänge in der D-A-CH-Region (Schweiz: Streckenlänge der Autobahn gemäß erster Klasse nach Straßeneinteilung der ASTRA) ..... 117
Tabelle 18: Energiebedarfe pro Jahr für elektrifizierte Baustellen ..... 119

## 6.3 Literaturverzeichnis


[1] Brocke et al., *Reconstructing the Giant: On the importance of rigour in documenting the literature search process*, ECIS 2009 Proceedings. Paper 161, 2009

[2] Webster et al., Analyzing the past to prepare for the future: Writing a literature review, MIS quarterly 26, no. 2, 2002

[3] Karlsson, Ida, Johan Rootzén, and Filip Johnsson, Reaching net-zero carbon emissions in construction supply chains–Analysis of a Swedish road construction project, Renewable and Sustainable Energy Reviews 120: 109651, 2020

[4] Huang, Xiaohui, et al., Prospects for purely electric construction machinery: Mechanical components, control strategies and typical machines, *Automation in Construction* 164: 105477., 2024

[5] Khamitov, Anvar, et al., Linear electric machine design for an off-highway vehicle hydraulic charge pump, IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), IEEE, 2019.

[6] Teizer, Jochen, and Søren Wandahl., Simplified emissions measurement system for construction equipment, Construction Research Congress, 2022.

[7] Kalociński, Tomasz, Modern trends in development of alternative powertrain systems for non-road machinery, Combustion Engines 61.1: 42-54, 2022.

[8] Wang, Jixin, et al., A comprehensive overview of hybrid construction machinery, Advances in Mechanical Engineering 8.3, 2016.

[9] Alan, Chauvin, et al., Optimal sizing of an energy storage system for a hybrid vehicle applied to an off-road application, *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*. IEEE, 2014.

[10] Zhang, Chao, et al., Energy storage system: Current studies on batteries and power condition system, Renewable and sustainable energy reviews 82: 3091-3106, 2018.

[11] Markert, Frank, et al., Risk and sustainability analysis of complex hydrogen infrastructures, international journal of hydrogen energy 42.11: 7698-7706, 2017.

[12] Pei, Y., et al., A comparative review study on the electrified road structures: performances, sustainability, and prospects. Structures 62: 106185, 2024,

[13] Patcharachavalit, Nuttapol, Charinee Limsawasd, and Nathee Athigakunagorn, Multiobjective optimization for improving sustainable equipment options in road construction projects, *Journal of Construction Engineering and Management* 149.1: 04022160, 2023.

[14] Lewis, Donovin, Damien Lawhorn, and Dan M. Ionel, On the Feasibility of Electrification for Large Mobile Cranes *2020 9th International Conference on Renewable Energy Research and Application (ICRERA),* IEEE, 2020.

[15] Moretti, L., et al. "Evaluation of the environmental and human health impact of road construction activities, *Journal of cleaner production* 172: 1004-1013, 2018.

[16] Kurz, Dariusz, et al. The use of renewable energy sources in road construction and public transport: A review., Energies 17.9: 2141, 2024

[17] Wang, Guangtao, et al., Feasibility analysis of hybrid energy generation systems for desert highway service areas: a case study in northern Xinjiang, China, *Frontiers in Energy Research* 12: 1362957, 2024.

[18] Liu, Yuanyuan, Yuanqing Wang, and Di Li, Estimation and uncertainty analysis on carbon dioxide emissions from construction phase of real highway projects in China, *Journal of cleaner production* 144: 337-346, 2017.

[19] Park, Jin-Young,parat and Byung-Soo Kim, Life-cycle assessment-based environmental impact estimation model for earthwork-type road projects in the design phase, *KSCE Journal of Civil Engineering* 23.2: 481-490, 2019.

[20] Gao, Shuohan, et al., Quantitative analysis of carbon emissions from highway construction based on life cycle assessment, *Sustainability* 16.14: 5897, 2024.

[21] Zhou, Xinxing, et al., Life cycle assessment of asphalt and cement pavements: Comparative cases in Shanxi Province, *Construction and Building Materials* 315: 125738, 2022.

[22] Liu, Yuanyuan, et al., Rethinking the carbon dioxide emissions of road sector: Integrating advanced vehicle technologies and construction supply chains mitigation options under decarbonization plans, *Journal of Cleaner Production* 321: 128769, 2021.

[23] Keller, Victor, et al., Electrification of road transportation with utility controlled charging: A case study for British Columbia with a 93% renewable electricity target, Applied Energy 253: 113536, 2019.

[24] Jiang, Wei, et al., Available solar resources and photovoltaic system planning strategy for highway." Renewable and Sustainable Energy Reviews 203: 114765, 2024.

[25] Yoffe, Hatzav, et al., Mapping construction sector greenhouse gas emissions: a crucial step in sustainably meeting increasing housing demands, *Environmental Research: Infrastructure and Sustainability* 4.2: 025006, 2024.

[26] Padovani, Damiano, Pavlos Dimitriou, and Tatiana Minav, Challenges and solutions for designing energy-efficient and low-pollutant machines in off-road hydraulics, *Energy Conversion and Management: X* 21: 100526, 2024.

[27] Padovani, D., et al., Energy analysis of a hybrid electro-hydraulic system for efficient mobile hydraulics, *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 2648. No. 1, IOP Publishing, 2023.

[28] Karlsson, Ida, et al., Roadmap for decarbonization of the building and construction industry—a supply chain analysis including primary production of steel and cement, *Energies* 13.16: 4136, 2020.

[29] Ramos, Mariana de F., et al. "A Study on the Performance of the Electrification of Hydraulic Implements in a Compact Non-Road Mobile Machine: A Case Applied to a Backhoe Loader, *World Electric Vehicle Journal* 15.4: 127, 2024.

[30] Zhang, Wei, et al., A generalized energy management framework for hybrid construction vehicles via model-based reinforcement learning, *Energy* 260: 124849, 2022.

[31] Pugi, Luca, et al., Electrification of directional drilling machines for sustainable trenchless excavations, *2019 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2019 IEEE*

*Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe),* IEEE, 2019.

[32] Qiao, Yuanlu, Jingpeng Wang, and Youguo Wang, Sustainability evaluation of green building construction based on a combination method of weighting and improved matter-element extension, *AIMS Mathematics* 9.9: 24418-24442, 2024.

[33] Shen, Wei, et al., Control strategy analysis of the hydraulic hybrid excavator, *Journal of the Franklin Institute* 352.2: 541-561, 2015.

[34] Li, Bei, and Jiangchen Li. "Using mobile hydrogen trucks to transport energy to microgrids, *IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia (I&CPS Asia),* IEEE, 2021.

[35] Casoli, Paolo, et al., Energy comparison between a load sensing system and electro-hydraulic solutions applied to a 9-ton excavator, *Energies* 15.7: 2583, 2022.

[36] Hossain, Md Fahim Tanvir, et al. "Harvesting solar energy from asphalt pavement, *Sustainability* 13.22: 12807, 2021.

[37] Chen, Qihuai, Tianliang Lin, and Haoling Ren, Parameters optimization and control strategy of power train systems in hybrid hydraulic excavators, *Mechatronics* 56: 16-25, 2018.

[38] Wang, Hong, Yanjun Huang, and Amir Khajepour, Cyber-physical control for energy management of off-road vehicles with hybrid energy storage systems, *IEEE/ASME transactions on mechatronics* 23.6: 2609-2618, 2018.

[39] Ge, S., et al., Optimal deployment of electric vehicle charging stations on the highway based on dynamic traffic simulation, *Trans. China Electrotech. Soc* 33.13: 2991-3001, 2018.

[40] Bertini, A., Massimo Ceraolo, and Giovanni Lutzemberger, Systematic approach in the hybridization of a hydraulic skid loader, *Automation in Construction* 58: 144-154, 2015.

[41] Zheng, Zhe, et al., Intelligent technologies for construction machinery using data-driven methods, *Automation in Construction* 147: 104711, 2023.

[42] Zhu, Yiyi, and Hongqin Fan, Use of biodiesel in non-road mobile machineries for low-carbon construction: policy review and lifecycle analysis, *Journal of Cleaner Production* 421: 138543, 2023.

[43] Anbari Moghadam, Mahdi, Morteza Bagherpour, and Seyed Farid Ghannadpour, Sustainability assessment in construction projects: a sustainable earned value management model under uncertain and unreliable conditions, *Environment Systems and Decisions* 44.1: 45-68, 2024.

[44] Swarnakar, Vikas, and Malik Khalfan, Circular economy in construction and demolition waste management: an in-depth review and future perspectives in the construction sector, *Smart and Sustainable Built Environment,* 2024.

[45] Li, Junjie, et al., Assessing the Mediating Role of E-Techniques in the Relationship Between Information Systems and Carbon Reduction Strategies During the Construction Phase of Chinese Construction Projects, *Journal of Information Systems Engineering and Management*, 9 (1): 21636, 2024.

[46] Kowalski, Jan, et al., Verification of performance standards for construction equipment in terms of CO2 emissions, *Sustainability* 15.21: 15188, 2023.

[47] Atchike, Desire Wade, et al., Empirical linkages of the construction sector, intensive energy consumption, and economic openness with chemical oxygen demand pollution, *Environmental Science and Pollution Research* 30.48: 105149-105165, 2023.

[48] Halvorsen, Eirik Oskari, and Henrik Andersson, Optimizing environmental and economic aspects of collaborative transportation and logistics related to infrastructure projects – A case study from Norway, *Waste Management* 156: 159-167, 2023.

[49] Wang, Kaiyang, and Fangyu Guo, Towards sustainable development through the perspective of construction 4.0: Systematic literature review and bibliometric analysis, *Buildings* 12.10: 1708, 2022.

[50] Luo, Wenkai, et al., A systematic review of green construction research using scientometrics methods, *Journal of Cleaner Production* 366: 132710, 2022.

[51] Huymajer, Marco, et al., An interdisciplinary systematic review on sustainability in tunneling — bibliometrics, challenges, and solutions, *Sustainability* 14.4: 2275, 2022.

[52] de Almeida Barbosa Franco, Jacqueline, et al., Sustainability in the civil construction sector supported by industry 4.0 technologies: Challenges and opportunities, *Infrastructures* 7.3: 43, 2022.

[53] Robinah, N., et al., Impact of road infrastructure equipment on the environment and surroundings, Global Journal of Environmental Science and Management 8 (2): 251-264, 2022.

[54] Çimen, Ömer., Construction and built environment in circular economy: A comprehensive literature review, *Journal of cleaner production* 305: 127180, 2021.

[55] Joensuu, Tuomo, Harry Edelman, and Arto Saari, Circular economy practices in the built environment, *Journal of cleaner production* 276: 124215, 2020.

[56] Hossain, Md Uzzal, et al., Circular economy and the construction industry: Existing trends, challenges and prospective framework for sustainable construction, *Renewable and sustainable energy reviews* 130: 109948, 2020.

[57] Hafifi Che Wahid, Che Muhammad Fatihi, et al., Carbon footprints calculator of highway pavement rehabilitation: The quantification of carbon emissions per unit activity, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 512. No. 1. IOP Publishing, 2019.

[58] Cai, Shaole, et al., Automatic shift control of an electric motor direct drive for an electric loader, *Machines* 10.5: 403, 2022.

[59] Gadiyar, Nishanth, James Van de Ven, and Eric L. Severson, Evaluation of torque-dense electric machine technology for off-highway vehicle electrification, *IEEE Transactions on Industry Applications* 60.2: 3062-3074, 2023.

[60] Bie, Pengju, et al., A review and evaluation of nonroad diesel mobile machinery emission control in China, *Journal of Environmental Sciences* 123: 30-40, 2023.

[61] Gadiyar, Nishanth, and Eric L. Severson, A review of torque-dense electric drive systems with potential to bridge the gap with hydraulics

for off-highway vehicle electrification, *2022 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC),* IEEE, 2022.

[62] Gadiyar, Nishanth, Anvar Khamitov, and Eric L. Severson, Comparison of linear and rotary electric machine topologies for a hybrid hydraulic electric architecture of off-highway vehicles, *2020 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC),* IEEE, 2020.

[63] Frank, Bobbie, Using optimal control in concept evaluation and system optimization of diesel-electric hybrid construction machines, *2016 International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC)*. IEEE, 2016.

[64] Kim, Si-Yeon, et al., A study on the construction of EV charging infrastructures in highway rest area, *4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives,* IEEE, 2013.

[65] Wang, Fusong, et al., Comparative assessments for environmental impacts from three advanced asphalt pavement construction cases, *Journal of Cleaner Production* 297: 126659, 2021.

[66] Du, Li, Yu Mei Li, and Cong Hao Li., Analyse the influence factors of energy-saving and emission-reduction in asphalt pavement construction, *Advanced Materials Research* 774: 913-918, 2013.

[67] Li, Fan, et al., Carbon emission calculation of construction machinery during the expressway construction period, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 657. No. 1. IOP Publishing, 2021.

[68] Masrur, M. Abul. "Hybrid and electric vehicle (HEV/EV) technologies for off-road applications." Proceedings of the IEEE 109.6: 1077-1093, 2020

[69] https://www.regjeringen.no/no/dokumenter/meld.-st.-25-20242025/id3095592/?ch=5, abgerufen am 21.05.2026

[70] https://www.vejdirektoratet.dk/infralca, abgerufen am 21.05.2026

[71] https://www.ft.dk/samling/20241/almdel/tru/spm/109/svar/2102792/2962968/index.htm, abgerufen am 22.05.2026

[72] Klimatarena Stockholm / Fossilfritt Sverige (2026): Upphandling av elektrifierade entreprenader – en exempelsammanställning. Vägledning, Version 1, 14. Januar 2026.

[73] https://www.rijkswaterstaat.nl/nieuws/archief/2026/03/rijkswaterstaat-past-co-prestatieladder-handboek-4-0-toe-in-gww-aanbestedingen-vanaf-1-juli-2026?utm, abgerufen am 22.05.2026

[74] Verkehr in Zahlen 2025/2026, Bundesministerium für Verkehr, 2025

[75] Zukunftsfit unterwegs – Netzzustandsbericht 2025, ASFiNAG, 2025

[76] Straße und Verkehr – Zahlen und Fakten, Bundesamt für Straßen ASTRA, 2011

[77] Netzzustandsbericht der Nationalstraßen, Bundesamt für Straßen ASTRA, 2020

[78] Netzzustandsbericht der Nationalstraßen, Bundesamt für Straßen ASTRA, 2024

[79] https://www.autobahn.de/aktuelles/aktuell/hitzeschaeden-autobahn-gmbh-hat-gefaehrdete-abschnitte-im-blick, abgerufen am 07.07.2026

[80] Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen, FGSV, 2012/2024, https://www.bmv.de/SharedDocs/DE/Artikel/StB/erhaltung-von-strassen.html, abgerufen am 07.07.2026.

[81] Straße und Verkehr 2024/2025, Bundesamt für Straßen ASTRA, 2025.

[82] https://ag-energiebilanzen.de/ag-energiebilanzen-veroeffentlicht-jahresbericht/, abgerufen am 13.08.2026

[83] Energie in Österreich, Bundesministerium für Wirtschaft, Energie und Tourismus, Wien 2025

[84] Schweizerische Elektrizitätsstatistik 2025, Bundesamt für Energie BFE, Bern, 2026

[85] https://www.autobahn.de/presse/mitteilung/autobahn-gmbh-vergibt-auftraege-fuer-den-aufbau-des-e-lkw-schnellladenetzes-auf-unbewirtschafteten-rastanlagen, abgerufen am 21.07.2026

[86] https://www.asfinag.at/ueber-uns/presse/pressemeldungen/erleichterung-zur-errichtung-von-ladeinfrastruktur-an-autobahnen/, abgerufen am 21.07.2026

[87] https://www.astra.admin.ch/de/newnsb/DI-AYyOZD4uYMIBWzfmdJ, abgerufen am 21.07.2026

[88] Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur, Einfach Laden am Depot – Leitfaden für den Aufbau von Ladeinfrastruktur für schwere Nutzfahrzeuge, waf.berlin, 2023

[89] Blumenfeld, Tim, et al., Multi-kritelle probabilistische Prognose der Zustandsentwicklung ProZEnt, BMVI, 2018

[90] https://nationalhighways.co.uk/roads-and-travel/road-projects/lower-thames-crossing/nature/cutting-carbon/, abgerufen am 24.08.2026

[91] https://www.find-tender.service.gov.uk/Notice/029497-2024, abgerufen am 24.08.2026

[92] https://www.find-tender.service.gov.uk/Notice/016677-2026, abgerufen am 24.08.2026

[93] Zukunftsfit unterwegs – Netzzustandsbericht 2023, ASFiNAG, 2023

[94] Bauabfälle in der Schweiz – Tiefbau, Aktualisierung 2015, Energie- und Ressour-cen-Management GmbH, 2016

[95] https://www.bundestag.de/webarchiv/presse/hib/2020_08/710006-710006, abgerufen am 03.10.2026

[96] https://www.astra.admin.ch/fr/einblick-rue-kue-fr, abgerufen am 03.10.2026

# 7 Anhang

## Anhang 1

### Leitfaden Interviews mit Anwendern von Baumaschinen (Bauunternehmen)

Allgemeines Thema Elektrifizierung:

- Welche Angebote von Baumaschinen und Baugeräten (handgeführt) sind im Bereich der Brennstoffzelle bekannt?
- Welche Angebote von Baumaschinen und Baugeräten (handgeführt) sind im Bereich der Batterie bekannt? (z. B.: Es existieren bereits Angebote in diesen Segmenten; es existieren derzeit eher Prototypen in diesen Segmenten)
- Welche Technologien werden für zukünftige Antriebsstränge von Baumaschinen derzeit am ehesten am Markt diskutiert? (z. B. Batterie/Brennstoffzelle/eFuels)
- Welche Produkte sollten neben der Baumaschine und Baugeräten (handgeführt) auf einer Baustelle mit einem emissionsfreien Antrieb ausgestattet werden? (z. B. Generatoren, sonst. Baugeräte)

Einordnung der Kundensicht:

- Welche Vorteile erhofft man sich von dem Einsatz emissionsfreier Antriebe (Batterie/Brennstoffzelle)? (z. B. geräuscharmer Betrieb, keine $CO_2$-Emissionen)
- Welche Herausforderungen werden im Einsatz von Brennstoffzellen oder Batterien als Antriebe für Baustellenfahrzeuge gesehen? z. B. schlecht ausgebaute Infrastruktur, harsche Umgebungsbedingungen, hohe Kosten)
- Für welche Produkttypen ziehen Sie eine Elektrifizierung in Betracht? Wieso diese?

Prämissen und Randbedingungen

- Inwiefern spielt die Ästhetik des Produktes für Sie eine Rolle bei der Miete?
- Wie muss die Infrastruktur für Elektro- und Wasserstoffmobilität aussehen, um Ihren Anforderungen gerecht zu werden?
- Wie geht die Einweisung der Belegschaft und Dritter vonstatten? Kann der Vermieter hier unterstützen? (z. B. durch QRCodes auf den Maschinen)
- Wie würde die anbieterseitige Eingrenzung auf alternative Antriebe ihr Tagesgeschäft beeinflussen?
- Welche weiteren Randbedingungen müssen aus Ihrer Sicht berücksichtigt werden? (z. B. Abschaltung des Stroms über Nacht, Gefahr der Sabotage und des Diebstahls, etc.)

Marktentwicklungstrends/Anforderungen an den Markt:

- Welche Preisveränderung sieht der Kunde relativ zum Ist (fossile Kraftstoffe), sobald emissionsfreie Antriebe eingesetzt werden?
- Wie sieht der Kunde zukünftig das Sourcing (Bezugsart) von Fahrzeugen/Geräten, die mit emissionsfreien Antrieben ausgestattet sind?

- Welche alternativen Produkte oder Dienstleistungen wünscht sich der Kunde vor dem Hintergrund des Themas Nachhaltigkeit? (z. B. Software zum Tracken von Emissionen, Nachhaltigkeitslabel)

## Anhang 2

## Leitfaden Herstellerinterviews

### Allgemeines

- Wie wird die Nutzungsmöglichkeit von alternativen Energieträgern innerhalb des befragten Unternehmens für Baumaschinen und Alternativen wahrgenommen?
- Welche Technologien werden für zukünftige Antriebsstränge von Baumaschinen derzeit am ehesten diskutiert? (z. B. Batterie/Brennstoffzelle/eFuels)
- Welche Produkte sollten neben der Baumaschine und Alternativen auf einer Baustelle mit einer Brennstoffzelle elektrifiziert werden? (z. B. Generatoren, sonst. Baugeräte?)
- Welche Technologie wird im Allgemeinen in Betracht gezogen, wenn die „Brennstoffzelle“ im Kontext von Baustellenanwendungen diskutiert wird (PEM/DMFC/SOFC)?
- Welche Herausforderungen existieren im Allgemeinen im Kontext alternativer Energieträger, sodass der Einsatz in einer Baumaschine unattraktiv ist? (z. B. Kosten, Lebensdauer, zu geringe Produktionsvolumina)
- Welche Vorteile weisen alternative Energieträger auf, sodass der Einsatz in einer Baumaschine gegenüber einem konventionellen Antrieb attraktiv ist? (z. B. $CO_2$-freier Betrieb realisierbar)

### Auslegung von Anlagen und Fahrzeugen

- Nach welchen Arbeitsszenarien/Leistungsszenarien/Lastprofilen wird ein typisches Produkt XYZ ausgelegt/konzipiert?
- Wie sieht ein typisches Lastprofil (z. B. Höhe der Antriebsleistung, dynamisches/statisches Belastungsprofil, Betriebsstunden/Tag, Energiebedarf/Schicht) aus, das zur Auslegung von Produkt XYZ herangezogen wird?
- Existieren mit einem Blick auf eine mögliche Elektrifizierung von den Produkten XYZ typische Produkttypen, die in Betracht gezogen werden?
- Welche Leistungsklassen werden allgemein für die Produkte XYZ für Elektrifizierungsprojekte mit einer Brennstoffzelle/Batterie in Betracht gezogen?
- Welche Restriktionen bestehen grundsätzlich hinsichtlich des Lastprofils, sodass ein Einsatz von Brennstoffzellensystemen/Batteriesystemen nicht (mehr) möglich ist?

### Integrationspotenziale

- Welche technischen Randbedingungen (sowohl positiv als auch negativ) existieren, die den Einbau von alternativen Antriebskonzepten beeinflussen? (z. B. Verfügbarkeit von Bauraum im Fahrzeug → „Flexibilität“ der Fahrzeugplattform, Masse eines Batteriesystems, Einhaltung von Sicherheitsstandards)
- Wie werden diese grundsätzlich für den UseCase „Brennstoffzelle“ und „Batterie“ für die Produkte XYZ bewertet?
- Welche Umgebungsbedingungen werden maßgeblich analysiert, um den Einsatz von alternativen Antriebskonzepten (Brennstoffzelle und Batterie) für die Produkte XYZ zu bewerten? (z. B. Vibrationen der Applikation, Qualität der Umgebungsluft, Verfügbarkeit von ausreichend Wasserstoff/elektrischer Energie)

## Kosten

- Wie sind die Kosten für ein Fahrzeug mit alternativem Antrieb gegenüber einem konventionellen Fahrzeug Produkt XYZ einzuschätzen? Kann ein Faktor zur Einordnung angegeben werden?
- Ab welchem Zeitraum ist eine Berücksichtigung von Brennstoffzellen/Batterien für das Segment der Baustellenfahrzeuge wirtschaftlich sinnvoll? Welche Randbedingungen beeinflussen diese Entwicklung (Kosten von Wasserstoff/Batterien, Regularien, Infrastruktur)

## Sonstiges

- Welche weiteren Anforderungen existieren, die an eine Brennstoffzellen/Batterieapplikation im Umfeld der Baumaschinen geknüpft sind?
- Welche Bestrebungen existieren innerhalb der Baumaschinen-Branche, sodass die Umsetzung/Realisierung der Brennstoffzelle/Batterie ermöglicht wird? (z. B. Lobbyismus, Erarbeitung von Studien)

## Anhang 3

## Katalog der Referenzfahrzeuge

| *Referenz-fahrzeug* | *Fahrzeugtyp / Eigenschaften* | *Klasse* | *Einsatz-gewicht [kg]* | *Energie-verbrauch [kWh/h]* | *Quelle* |
|---|---|---|---|---|---|
| **Fugenschneider** | Fugenschneider | XS | 150 | 29,1 | ERA / Abschätzung |
| **EB 80/120 SP** | Gussasphalteinbaubohle | XS | 2.500 | 48,5 | ERA / Abschätzung |
| **Vergusskocher** | Vergusskocher | XS | 3.500 | 63,9 | ERA / Abschätzung |
| **Mercedes eSprinter** | Sprinter | XS | 4.250 | 69,8 | ERA / Abschätzung |
| **Johnston C202** | Kehrmaschine | XS | 4.500 | 41,7 | Hersteller |
| **Bomag BW 174 AP-5** | Tandemwalze, 10 t Einsatzgewicht | S | 10.000 | 99,9 | Zeppelin Rental |
| **CAT D4** | Leichter Kettendozer, 13-t-Einsatzgewicht | S | 13.300 | 88,3 | Zeppelin Rental |
| **CAT 930** | Radlader, 13-t-Klasse | S | 14.000 | 84,4 | Zeppelin Rental |
| **CAT 315** | Hydraulikbagger, 15-t-Klasse | S | 16.000 | 73,7 | Zeppelin Rental |
| **Wirtgen W 100 Fi** | Kompaktfräse, 1m Fräsbreite | S | 19.700 | 243,5 | Hersteller |
| **CAT CS 74B** | Vibrationswalze, 16 t Einsatzgewicht | M | 16.000 | 100,9 | Zeppelin Rental |
| **CAT D5** | Mittelschwerer Kettendozer, 17-t-Einsatzgewicht | M | 17.200 | 116,4 | Zeppelin Rental |
| **CAT 140** | Grader | M | 17.565 | 164,1 | Zeppelin Rental |
| **Vögele SUPER 1600-3i** | Asphaltfertiger, bis 7,5m Einbaubreite | M | 19.000 | 152,8 | ERA / Abschätzung |
| **CAT 950** | Radlader, 18-t-Klasse | M | 19.000 | 109,1 | Zeppelin Rental |
| **CAT D6** | Mittelschwerer Kettendozer, 22-t-Einsatzgewicht | M | 22.000 | 164,9 | Zeppelin Rental |
| **CAT 966** | Radlader, 20-t-Klasse | M | 23.200 | 135,8 | Zeppelin Rental |
| **Sprüh-LKW** | Sprüh-LKW | M | 25.000 | 195,6 | ERA / Abschätzung |
| **CAT 325** | Hydraulikbagger, 25-t-Klasse | M | 25.500 | 105,7 | Zeppelin Rental |

| *Referenz-fahrzeug* | *Fahrzeugtyp / Eigenschaften* | *Klasse* | *Einsatz-gewicht [kg]* | *Energie-verbrauch [kWh/h]* | *Quelle* |
|---|---|---|---|---|---|
| **Wasserwagen** | Wasserwagen | M | 26.000 | 195,6 | ERA / Abschätzung |
| **Kanalspülwagen** | Kanalspülwagen | M | 26.000 | 195,6 | ERA / Abschätzung |
| **Wirtgen SP 94i** | Gleitschalungsfertiger für Betondecken, bis 9,5m Breite | M | 28.000 | 404,5 | Hersteller |
| **Bomag BW 28 RH** | Gummiradwalze, 28 t Einsatzgewicht | M | 28.000 | 100,9 | Zeppelin Rental |
| **Wirtgen W 150 Fi** | Kompaktfräse, 1.5m Fräsbreite | M | 28.400 | 271,6 | Hersteller |
| **Mercedes-Benz Arocs 4142 B 8x4** | Vierachsiger Fahrmischer, bis 24 t Zuladung | M | 32.000 | 195,6 | ERA / Abschätzung |
| **Mercedes-Benz Arocs 4145 K 8x4/4** | Vierachsiger Baustellenkipper, bis 26 t Zuladung | M | 41.000 | 195,6 | ERA / Abschätzung |
| **CAT 725** | Knickgelenkter Muldenkipper, 25-t-Nutzlast | M | 47.000 | 122,3 | Zeppelin Rental |
| **Vögele SUPER 1800-5i** | Asphaltfertiger, bis 10m Einbaubreite | L | 21.500 | 169,8 | ERA / Abschätzung |
| **Vögele MT 3000-3i Offset** | Beschicker, ab 1200t/h | L | 24.500 | 242,5 | ERA / Abschätzung |
| **CAT 330** | Hydraulikbagger, 30-t-Klasse | L | 30.900 | 162,0 | Zeppelin Rental |
| **Wirtgen SP 124i** | Gleitschalungsfertiger für Betondecken, bis 12m Breite | L | 35.000 | 543,2 | Hersteller |
| **Linnhoff & Henne Transportkocher AW** | Mobiler Asphaltkocher, bis 12.000 l (entspricht ca. 30t Asphalt) | L | 44.000 | 48,5 | Hersteller |
| **CAT 730** | Knickgelenkter Muldenkipper, 30-t-Nutzlast | L | 51.000 | 140,6 | Zeppelin Rental |
| **Vögele SUPER 3000-3i** | Asphaltfertiger, ab 10m Einbaubreite | XL | 33.000 | 254,6 | ERA / Abschätzung |
| **Wirtgen W 250 Fi** | Großfräse, mit 2.2m Fräsbreite | XL | 42.800 | 756,6 | Hersteller |
| **Wirtgen SP 154i** | Gleitschalungsfertiger für Betondecken, bis 15,5m Breite | XL | 48.000 | 571,3 | Hersteller |

## Anhang 4

## Kalibrierung des Relevanzfaktors je Sanierungstyp

| **Sanierungstyp** | ***Ø Betriebsstunden* je Fzg. Transportfahrzeug (weiße Flotte) [h]** | ***Ø Betriebsstunden* je Fzg. Kern-Arbeitsmaschine (gelbe Flotte) [h]** | ***Ø Betriebsstunden* je Fzg. Neben-Arbeitsmaschine [h]** | **r Transportfahrzeug (weiße Flotte)** | **r Kern-Arbeitsmaschine (gelbe Flotte)** | **r Neben-Arbeitsmaschine** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Grundhafte Sanierung Asphaltstraße (Walzasphalt) | 255,7 | 188,5 | 82,6 | 1,36 | 1,00 | 0,44 |
| Grundhafte Sanierung Asphaltstraße (Gussasphalt) | 179,3 | 164,7 | 87,3 | 1,09 | 1,00 | 0,53 |
| Grundhafte Sanierung Betonstraße | 178,5 | 175,0 | 72,2 | 1,02 | 1,00 | 0,41 |
| Deckensanierung Asphaltstraße (Walzasphalt) | 102,4 | 75,0 | 52,1 | 1,37 | 1,00 | 0,70 |
| Deckensanierung Asphaltstraße (Gussasphalt) | 75,5 | 63,2 | 61,6 | 1,19 | 1,00 | 0,97 |
| **Mittelwert** | **158,3** | **133,3** | **71,2** | **1,21** | **1,00** | **0,61** |