



Mittelstand 4.0
Kompetenzentrum
Stuttgart

#digitalinBW



LEITFADEN

Emissionsfreie Abfallsammelfahrzeuge

Entsorgungslogistik mit alternativen Antriebskonzepten

Mittelstand-
Digital

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Editorial

Liebe Leserinnen und Leser,

Klimaziele und Gesetze setzen Flottenmanager*innen von kommunalen Unternehmen zunehmend unter Handlungsdruck. Als Innovatoren und Gestalter haben kommunale Unternehmen die Chance, durch den Einsatz von alternativen Antriebskonzepten in der Entsorgungslogistik, aktiv Emissionen zu verhindern. So wird für eine Lärmmentlastung in den Städten, Dörfern und auf dem Land gesorgt. Aber welche alternative Antriebstechnologie ist für ihr Sammel- und Einsatzgebiet die geeignetste? Sind betriebliche Anpassungen notwendig und ist die Betriebssicherheit gewährleistet?

Der erfolgreichen Etablierung neuer Antriebstechnologien geht das Überwinden von Hindernissen und Skepsis voraus. Für die Anforderungsprofile von Abfallsammelfahrzeugen sind batterieelektrische und wasserstoffbetriebene Antriebssysteme am geeignetsten und mittlerweile bieten etablierte Unternehmen erste Vorserienmodelle an. Beide alternativen Antriebskonzepte haben gegenüber dem konventionellen Verbrenner deutliche Vorteile durch lokal emissionsfreie Müllentsorgung und einfache Lärmmentlastung.

Um die Marktsituation mit dem individuellen Bedarf zu kombinieren, empfiehlt sich eine Flottenanalyse, die Modelloptionen gegenüberstellt und kommunalen Flottenmanager*innen bei der Suche nach dem passenden klimafreundlichen Antriebssystem unterstützt. Um eine erfolgreiche Transformation und Dekarbonisierung der Abfallsammelfahrzeuge ohne Einschränkung der Betriebssicherheit zu garantieren, ist eine grundlegende Analyse des aktuellen Fuhrparks notwendig.

Haben Sie mit Ihrem kommunalen Unternehmen den Bedarf und Wunsch, alternative Antriebskonzepte in der Abfallentsorgung einzusetzen? Haben Sie geplant ein Abfallsammelfahrzeug mit alternativem Antriebskonzept zu erwerben, sind sich aber noch unsicher, ob Technologiereifegrad und Reichweite ausreichend sind? Dann möchten wir Sie als Mittelstand 4.0-Kompetenzzentrum Stuttgart gerne kostenlos dabei unterstützen, umweltfreundliche Abfallsammelfahrzeuge auf die Straße zu bringen.

Wir freuen uns auf die Zusammenarbeit mit Ihnen.



Felix Otteny
Themenfeld "Mobilität"



Jörg Castor
Leitung
Kompetenzzentrum

Inhalt

1. An wen richtet sich der Leitfaden?	4
2. Alternative Antriebskonzepte	5
2.1 Antriebstechnologie	5
2.2 Technologiereife und Wirkungsgrad	7
2.3. Laden bzw. Tanken.	9
2.4. Kostenrelevanz.	12
2.5. Klimarelevanz	14
2.6. Marktanalyse	17
3. Schritte zur Flottentransformation	19

Ihr Kontakt zu uns	22
Quellenverzeichnis	24
Bildnachweis	25
Impressum.	25

1. An wen richtet sich der Leitfaden?

Die Verkehrswende ist bei Pkws mit dem Umstieg auf Elektromobilität in vollem Gange und kommunale Fahrzeugflotten nehmen eine Vorreiterrolle ein. Städte, Gemeinde und Unternehmen haben die große Chance den Umstieg auf alternative Antriebskonzepte beispielhaft und gezielt voranzutreiben. Als nächste notwendige Stufe der Verkehrswende stehen die emissionsfreien Nutzfahrzeuge in den Startlöchern. Mit dem Gesetz über die Beschaffung sauberer Straßenfahrzeuge werden ab dem 2. August 2021 verbindliche Mindestziele für emissionsarme und -freie leichte und schwere Nutzfahrzeuge bei der öffentlichen Auftragsvergabe vorgegeben¹. Die Vorgaben verpflichten die öffentliche Hand und öffentlichen Dienstleistungsaufträge dazu, dass die Flottengrenzwerte für schwere Nutzfahrzeuge bis 2025 um 15 Prozent und bis 2030 um 30 Prozent gesenkt werden. Lediglich die beiden alternativen Antriebskonzepte mit Batterie und Wasserstoff erfüllen die Anforderungen an einen emissionsfreien Antrieb. In diesem Zusammenhang bilden neu angeschaffte Abfallsammelfahrzeuge für die Abholung von Siedlungsabfällen in Zukunft einen Hebel für kommunale emissionsfreie Mobilität.

Jeden Tag werden in Deutschland 31.500 Tonnen Abfall durch kommunale Unternehmen entsorgt und sorgen somit dafür, dass Deutschland mit rund 66 Prozent die höchste Recyclingquote in der Europäischen Union erzielt². Im Vergleich zu 1990 hat die kommunale Abfallwirtschaft die CO₂-Emissionen um 76 % gesenkt und ist damit „Hidden Champion“ beim Umweltschutz³. Um diesen Titel erfolgreich zu verteidigen ist der nächste Schritt die erfolgreiche Transformation der Abfalltransportkette weg vom Verbrenner hin zu emissionsfreien Fahrzeugen.

Der hier beschriebene Leitfaden wendet sich an Flottenbetreiber*innen von Abfallsammelfahrzeugen, die in ihrer Flotte alternative Antriebskonzepte einsetzen möchten. Ziel ist den Flottenbetreiber*innen die grundlegenden Aspekte der klimafreundlichen Antriebstechnologie von Batterie und Wasserstoff zu erläutern und welche Bausteine bei der Einführung zu beachten sind. Bestandteil des Leitfadens ist ein Überblick über die emissionsfreien Antriebstechnologien, von der Infrastruktur über das Fahrzeug bis hin zum Betrieb.

2. Alternative Antriebskonzepte

Um die CO₂-Vorgaben der EU für Nutzfahrzeuge einzuhalten, sind neue technische Konzeptionen der Antriebstechnik notwendig. Durch die Nutzung von Strom aus erneuerbaren Energien bieten batterieelektrische (BEV – engl. battery electric vehicle) und Brennstoffzellen-Fahrzeuge (FCEV – engl. fuel cell electric vehicle) neue CO₂-Einsparpotenziale, die bisher bei Nutzfahrzeugen ungenutzt blieben. Die Einführung von Abfallsammelfahrzeugen mit alternativen Antriebskonzepten wird nur gelingen, wenn die betrieblichen Anforderungen hinsichtlich Nutzlast und Reichweite erfolgreich abgedeckt werden und keine umfangreiche Anpassung des Nutzerverhaltens erforderlich ist.

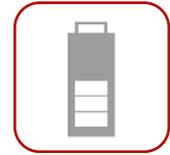
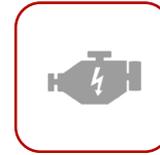
2.1 Antriebstechnologie

Bisher verfügen am Markt erhältliche Abfallsammelfahrzeuge meist ein dieselmotorisches System, das neben dem Antriebsstrang alle an Bord vorhandenen Hilfsaggregate mit Energie versorgt. Um die Minderung der spezifischen Treibhausgasemissionen zeitnah zu erzielen sind zwei Kriterien für die Einführung der Antriebstechnologie entscheidend: die Dekarbonisierungsfähigkeit und das Mengenpotential. Die Dekarbonisierungsfähigkeit beschreibt das Potential zur Minderung der Treibhausgasemissionen pro Fahrzeugkilometer und ist als strombasierter Ausbaupfad mit erneuerbarem Strom verbunden. Das Mengenpotential ist notwendig für die Beurteilung, ob die Technologie einen nachhaltigen Anteil am gesamten Technologiemarkt ausmachen und zukünftig einen signifikanten Marktanteil abdecken kann. Folgende Antriebstechnologien erfüllen für Abfallsammelfahrzeuge die beiden Kriterien: Batterie- und Brennstoffzellenantrieb.



Batterie – Abfallsammelfahrzeug

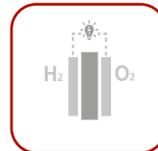
Ein Elektromotor wird durch eine Batterie mit elektrischer Energie versorgt. Über einen Stromanschluss wird die Batterie extern aufgeladen. Neben dem Ladevorgang an einer Ladestation ist zusätzlich die Energierückgewinnung während des Bremsvorgangs durch Rekuperation möglich. Die Batterie verfügt über eine hohe Spannung, um bei der jeweils benötigten Leistung, die notwendige elektrische Stromstärke bereitzustellen. Der Elektromotor wird über die Batterie versorgt, wobei der aus der Batterie stammende Gleichstrom zuvor mit einem Umrichter in Wechselstrom umgewandelt wird. Aktuell werden Lithium-Ionen-Batterien mit flüssigem Elektrolyt für die Stromspeicherung an Bord eingesetzt. Aufgrund der geringen spezifischen gravimetrischen Kapazität von Lithium-Ionen-Batterien mit 1 kWh/kg sind für große Reichweiten entsprechend große und schwere Batterien notwendig.



Brennstoffzelle – Abfallsammelfahrzeug

Mittels einer Brennstoffzelle wird während der Fahrt Wasserstoff in elektrische Energie umgewandelt, die nach der Zwischenspeicherung in einer Batterie schlussendlich einen Elektromotor antreibt. Als chemischer Energiespeicher wird der Wasserstoff in Tanks gespeichert.

In der Brennstoffzelle reagiert Wasserstoff mit Sauerstoff zu Wasser und es wird elektrische und thermische Energie freigesetzt. Der Prozess wird als kalte Verbrennung bezeichnet. Bei einem Brennstoffzellenfahrzeug wird die komplette erforderliche Energie für den Betrieb aus dem Wasserstofftank entnommen. Zwischen den Konzepten von Batterie- und der Brennstoffzellenfahrzeuge gibt es Hybridfahrzeuge, die sich aus unterschiedlichen Kombinationen der Batterie und Brennstoffzelle zusammensetzen. Dabei sind verschiedene Betriebsstrategien möglich, die anhand der Primärenergiequelle definiert werden.



Eines dieser Konzepte ist das des Range Extenders. Hierbei dient die Batterie als primäre Energiequelle, die am Stromnetz geladen wird. Die Brennstoffzelle dient als Sekundärquelle der Reichweitenverlängerung des Fahrzeugs und wird aktiviert, wenn die Batterie einen gewissen State of Charge (SOC)

unterschreitet. Eine zentrale Komponente für Brennstoffzellenfahrzeuge stellt der Wasserstofftank dar. Der Tank speichert den Wasserstoff, der der Brennstoffzelle zur Verfügung gestellt wird. Wasserstoff besitzt unter Normalbedingungen eine Dichte von $0,089 \text{ kg/m}^3$, weshalb zur Speicherung Hochdrucktanks verwendet werden, die eine komprimierte Aufbewahrung ermöglichen. Die Wasserstoff-Speicherkapazität von unter 20 kg ist für die Nutzungsprofile von Abfallsammelfahrzeugen ausreichend.

2.2 Technologiereife und Wirkungsgrad

Die Energieeffizienz im Fahrzeugbetrieb ist ein entscheidender Faktor für die erfolgreiche Einführung von alternativen Antriebskonzepten. Da die alternativen Antriebskonzepte bei Abfallsammelfahrzeugen aktuell noch nicht über den Status von Vorserien hinauskommen, ist zwar eine Marktnähe vorhanden, die vollständige technische Reife aber noch nicht erreicht. Die unterschiedlichen Technologiereifegrade der alternativen Antriebstechnologien werden in Tabelle 1 aufgeführt.

	BEV	FCEV
Technologiereifegrad	7 – 8 Qualifiziertes System mit Nachweis der Funktionstüchtigkeit im Einsatzbereich	6 – 7 Prototyp im Einsatz (1 – 5 Jahre)
Zentrale Herausforderung	Reichweite, Ladedauer, Zuladungsverluste	Wirkungsgrad, Kostenreduktion

Tabelle 1: Technologiereifegrad⁴

Um den Wirkungsgrad der Antriebstechnologien zu vergleichen ist die vollständige Betrachtung der Prozesskette notwendig. Von der Stromerzeugung über die Lade/Tankstation bis zum Speicher und innerhalb des Abfallsammelfahrzeuges vom Speicher bis zur kinetischen Energie. Die Wirkungsgrade der alternativen Antriebssysteme nach einzelnen Prozessschritten sind in Abbildung 1 dargestellt.

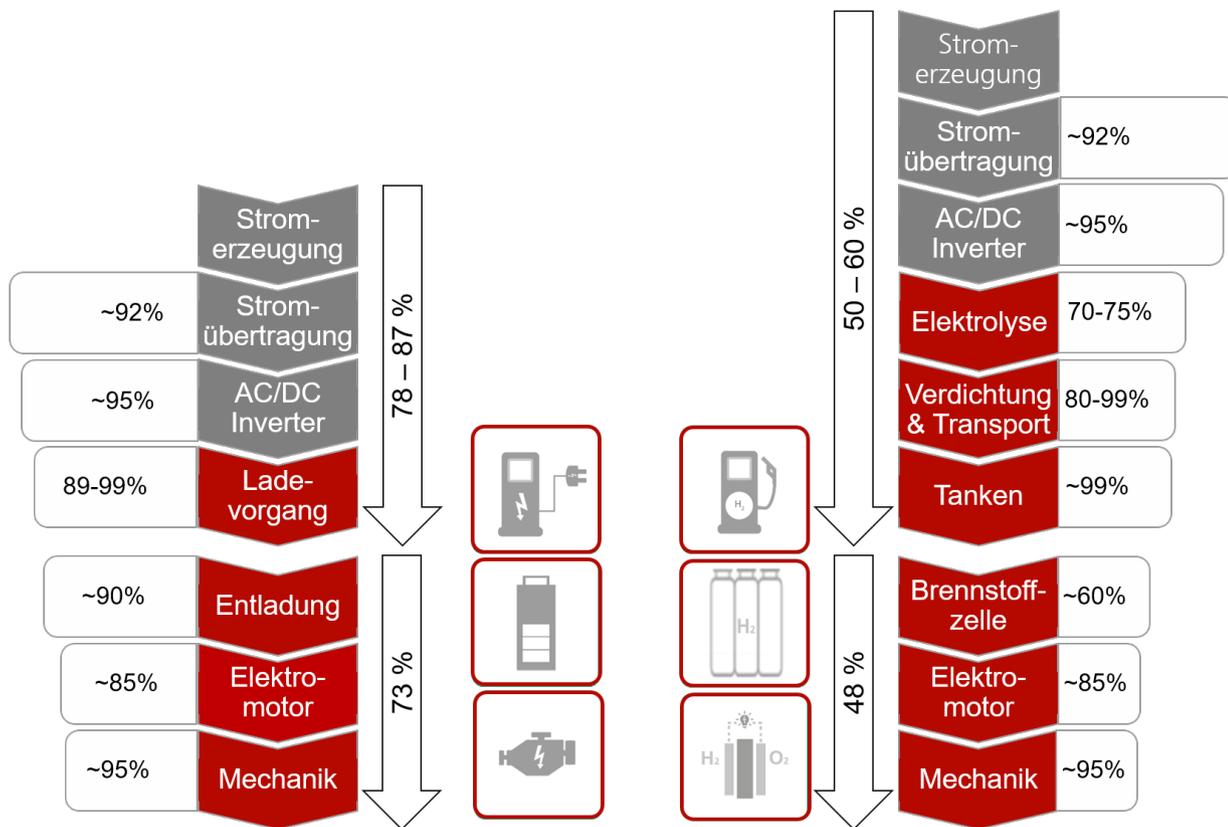


Abbildung 1: Alternative Antriebssysteme- Prozesskette und Wirkungsgrade

2.3. Laden bzw. Tanken

Sowohl Batterie- als auch Brennstoffzellenfahrzeuge benötigen eine eigene Infrastruktur zum Laden bzw. Tanken der Abfallsammelfahrzeuge. Da diese notwendige Energiebereitstellung bislang öffentlich nicht ausreichend verfügbar ist, müssen die Betriebe in den meisten Fällen die Infrastruktur aufbauen und somit in Eigenleistung zur Verfügung stellen.

Laden – Batterie

Abfallsammelfahrzeuge werden im Betrieb vorrausichtlich als sogenannte Vollader eingesetzt. Das Betriebsverhalten beschränken Vollader auf regelmäßiges Laden am Betriebshof ohne Zwischenladen an externen Ladestationen. Als Vollader wird sich der Ladestandort bei den Abfallsammelfahrzeugen höchstwahrscheinlich auf den Ladestandort am Betriebshof beschränken. Volladern erfordern keine Anpassung des Mobilitätsverhaltens aufgrund von begrenzter Reichweite, da alle konventionellen Fahrprofile durch batterieelektrische Fahrzeuge ohne Nachladen abgedeckt werden können. Ein Zwischenladen am Betriebshof während der Pausen könnte hierbei die Ladevorgänge über Nacht ergänzen. Die Ladestationen auf Betriebshöfen sind in der Regel über Mittelspannungstransformatoren an das Mittelspannungsnetz angeschlossen. Die Leistung der installierten Ladeinfrastruktur ist an die eingesetzten Batteriekapazitäten unter Berücksichtigung der Standzeiten am Betriebshof und somit der potenziellen Ladezeiten anzupassen. Bei der Dimensionierung der Ladeinfrastruktur ist für die resultierende Gesamtanschlussleistung zu beachten, dass es zu großen zeitlichen Überschneidungen der Ladevorgängen bei einer Vielzahl an batterieelektrischen Abfallsammelfahrzeugen kommen kann, was zu Netzüberlastungen führt. Um Netzüberlastungen zu verhindern und eine bedarfsgerechte Netzintegration der Batterie-Abfallsammelfahrzeuge zu gewährleisten sind folgende Einflussfaktoren zu berücksichtigen:

- ▶ Netzanschlusspunkt in Verbindung mit installierter Leistung
- ▶ Nutzerprofile und Steuerbarkeit des Ladevorgangs
- ▶ Gleichzeitigkeit

Die Installation der Ladestationen führt zusätzlich zu einem Verlust an Stellplätzen. Je nach Positionierung der Ladestationen und Kabelführung ist mit einem Platzverlust von 10 % pro Ladestation auf dem Betriebshof zu rechnen.

Batterie-Abfallsammelfahrzeuge werden mithilfe von kontaktbasierten Ladestationen mit bis zu 150 kW geladen. Die Verbindung zwischen Fahrzeug und Ladestation erfolgt über eine fahrzeugseitige Buchse und einen Stecker. Für hohe Ladeleistungen über 50 kW ist das Gleichstromladen erforderlich, bei dem sich zunehmend der CCS-Stecker durchsetzt.

Tanken - Wasserstoff

Die Bereitstellung von Wasserstoff beruht auf unterschiedlichen Herstellungsverfahren. Wasserstoff wird aus Erdgas mittels Dampfreformierung bzw. die Elektrolyse von Wasser gewonnen. Zur Nutzung im Fahrzeug wird der Wasserstoff auf das im Fahrzeugtank herrschende Druckniveau komprimiert. Je nach lokalen Randbedingungen kann die Wasserstoffbereitstellung über vier unterschiedliche Wege stattfinden:

- ▶ Anlieferung von Wasserstoff mit Trailern
 - Gasförmig: 200 – 500 bar, 400 – 1.200 kg
 - Flüssig: 4.000 kg
- ▶ Anlieferung per Rohrleitung bei geographischer Nähe zum Erzeuger
- ▶ Vor-Ort-Erzeugung
- ▶ Nutzung von öffentlichen Tankstellen in geographischer Nähe

Ein Standard bei der Betankung von Lkws, wie die 700 bar gasförmiger Wasserstoff beim Pkw, hat sich bisher noch nicht herausgebildet. Die bisher fehlende Standardisierung für die Betankung der Nutzfahrzeuge stellt ein Hemmnis dar. Der Aufbau der bedarfsgerechten Tankinfrastruktur erfolgt nach Anwendungsfällen basierend auf unterschiedlichen Anforderungen. Wie in Tabelle 2 dargestellt existieren drei Kraftstoffoptionen für Wasserstoff.

Abfallsammelfahrzeug		
Aggregatzustand/Druck	Keine Standardisierung, gasförmig 350 oder 700 bar oder flüssig	
Tankvorgang	Tankprotokoll für 350 bar existiert Tankprotokoll für 700 bar oder flüssig noch nicht vorhanden	
Standort	Öffentliche Tankstelle	Betriebshof
Tankvorgang	Je nach Tankstellenauslegung sind gute <i>Back-to-Back Kapazitäten</i> * notwendig	Aufgrund der zeitlichen Überschneidung der Tankvorgänge, z.B. abends nach zurückkehren aus den Sammelgebieten, ist eine sehr gute <i>Back-to-Back Kapazität</i> erforderlich

Tabelle 2: Tankoptionen Wasserstofftankstelle ⁵

Für ein Tankvorgang an einer Wasserstofftankstelle wird aktuell eine Tankzeit von ca. 20 Minuten angesetzt.

*Mit *Back-to-Back-Kapazitäten* sind mehrere Betankungen nacheinander mit nur geringen oder ohne Wartezeiten gemeint. Anders als bei der Betankung mit Diesel ist bei Wasserstoff der Füllstand des Speichertanks und somit dessen Druck entscheidend für die Betankungsgeschwindigkeit.

2.4. Kostenrelevanz

Bei der Wirtschaftlichkeitsrechnung von unterschiedlichen Antriebskonzepten ist eine vollständige Betrachtung der Fahrzeuganschaffung und des Betriebs notwendig. Für Abfallsammelfahrzeuge ist somit eine Total-Cost-of-Ownership-Analyse zu empfehlen, um eine gesamtheitliche Kostenbetrachtung aus der Sicht von Betreiber*innen zu gewährleisten. Hierbei werden eventuelle Kostennachteile bei z.B. der Fahrzeuganschaffung und Kostenvorteile bei z.B. Fahrzeugbetrieb von alternativen Antriebskonzepten aufgezeigt und Kostentreiber identifiziert. Die wirtschaftliche Bilanz setzt sich aus CAPEX (Investitionskosten) und OPEX (Betriebskosten) zusammen und ist in Abbildung 2 dargestellt.

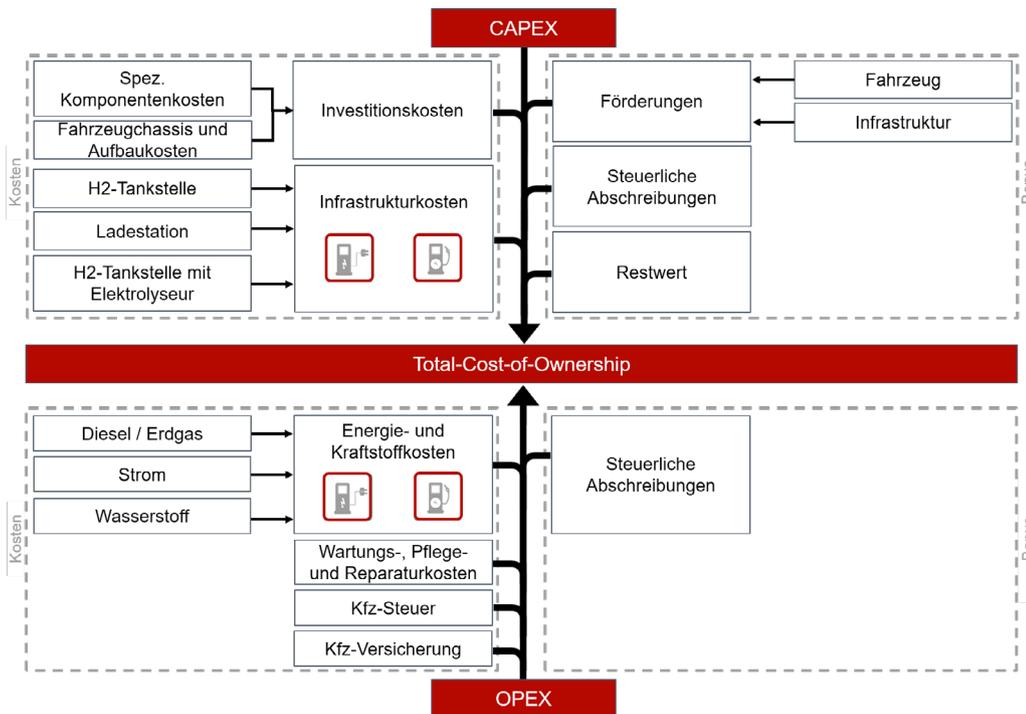


Abbildung 2: Total-Cost-of-Ownership für Abfallsammelfahrzeuge

Die Preisentwicklung der Technologien sowie der dazugehörigen Energieträger sind ausschlaggebend für die Gesamtkosten der verschiedenen Antriebe. Die Investitionskosten für Abfallsammelfahrzeuge mit alternativen Antriebskonzepten sind aktuell deutlich höher als bei konventionellen Vergleichsmodellen. Die höheren Investitionskosten sind auf die unterschiedliche Technologiereife und den Status der Vorserienproduktion zurück zu führen. Für die Tendenz der Investitionskosten von alternativen Antriebstechnologien spielt die Preisentwicklung der spezifischen Komponentenkosten eine große Rolle. Für die zukünftige Preisentwicklung von Batterie, Brennstoffzelle und Wasserstofftanks sowie Lade-/Tankinfrastruktur sind fallende Kosten prognostiziert. Während die Anschaffungskosten maßgeblich von der Kostenentwicklung der Antriebstechnologien abhängen, zeigt sich bei den Kraftstoffkosten die gleiche Abhängigkeit bezüglich der Energieträger. Hierbei sind die Energiekosten stark abhängig von der vorhandenen Infrastruktur und in welcher Höhe der Energiebedarf durch Eigenerzeugung gedeckt wird. In Tabelle 3 sind relevante Kostenpunkte beider Antriebskonzepte aufgeführt.

	BEV	FCEV
Fahrzeug	450.000 – 650.000 €	600.000 – 850.000 €
Infrastruktur	<ul style="list-style-type: none"> • Ladesäule: 500 – 800 €/kW maximale Ladeleistung zzgl. Installation • Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen jährlich 2,0 – 2,5% der Investitionskosten 	<ul style="list-style-type: none"> • Tankstelle: 1 – 1,5 Mio. € zzgl. Anpassung Werkstätte und Abstellhallen • Elektrolyseur: 1.000 - 1.500 €/kW • Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen jährlich 2 – 5% der Investitionskosten
Betrieb	<ul style="list-style-type: none"> • Strombezugskosten 0,15 – 0,20 €/kWh • Wartungs-, Pflege und Reparaturkosten 1,0 – 2,2 €/km • Kfz-Steuer entfällt 	<ul style="list-style-type: none"> • Wasserstoffbereitstellung 5,50 - 9,00 €/kg • Wartungs-, Pflege und Reparaturkosten 1,5 – 2,2 €/km • Kfz-Steuer entfällt

Tabelle 3: Kostenparameter von alternativen Antriebstechnologien^{6,7,8}

2.5. Klimarelevanz

Für eine klimafreundliche Abfallogistik stellen alternative Antriebskonzepte eine notwendige Maßnahme zur Reduzierung der verkehrsbedingten CO₂-Emissionen dar. Aufgrund des Einsatzes von Elektromotoren sind die hier betrachteten alternativen Antriebskonzepte lokal emissionsfrei. Zusätzlich wird die Feinstaubbelastung durch Bremsabrieb deutlich gesenkt, da bei Batterie und Brennstoffzellen-Fahrzeuge durch Rekuperation der Hauptanteil der Bremskraft erzeugt wird.

Um die Umweltaspekte im Laufe des Lebenszyklus eines Fahrzeuges zu analysieren, ist die Ökobilanzierung ein häufig angewandtes Verfahren. Eine Ökobilanz setzt sich aus einer medienübergreifenden und stoffstromintegrierten Betrachtung zusammen. Zur ökologischen Analyse von Abfallsammelfahrzeugen bietet sich das Carbon Footprint Verfahren an, das alle Treibhausgasemissionen bilanziert, die während des kompletten Lebenszyklus eines Produktes entstehen. Mit Hilfe des CO₂-Äquivalents (CO₂e) als Maßeinheit für die Klimawirkung wird eine Vereinheitlichung der Auswirkungen der unterschiedlichen Treibhausgase eingesetzt und das Treibhauspotential beschrieben. Der Index zeigt die Erwärmungswirkung eines Treibhausgases im Vergleich zu derjenigen von CO₂. In der Norm DIN EN ISO 14067 ist der Carbon Footprint von Produkten festgeschrieben.

Für die Ökobilanz der Abfallsammelfahrzeuge mit alternativen Antriebskonzepten werden emittierten Treibhausgase der unterschiedlichen Lebensphase Herstellung, Betrieb und Entsorgung differenziert betrachtet. Die Betriebsphase wird in Well-to-Tank und Tank-to-Wheel aufgeteilt. Well-to-Tank umfasst die ausgestoßenen Emissionen während der Bereitstellungsphase von Energien und Kraftstoffen und damit die Produktion von Strom und Wasserstoff bis zur Lade- oder Tanksäule. Tank-to-Wheel hingegen beschreibt die Phase, die von der Energieaufnahme bis einschließlich der Nutzung reicht. Der Untersuchungsrahmen der Ökobilanz für alternative Antriebstechnologien ist in Abbildung 3 aufgezeichnet.

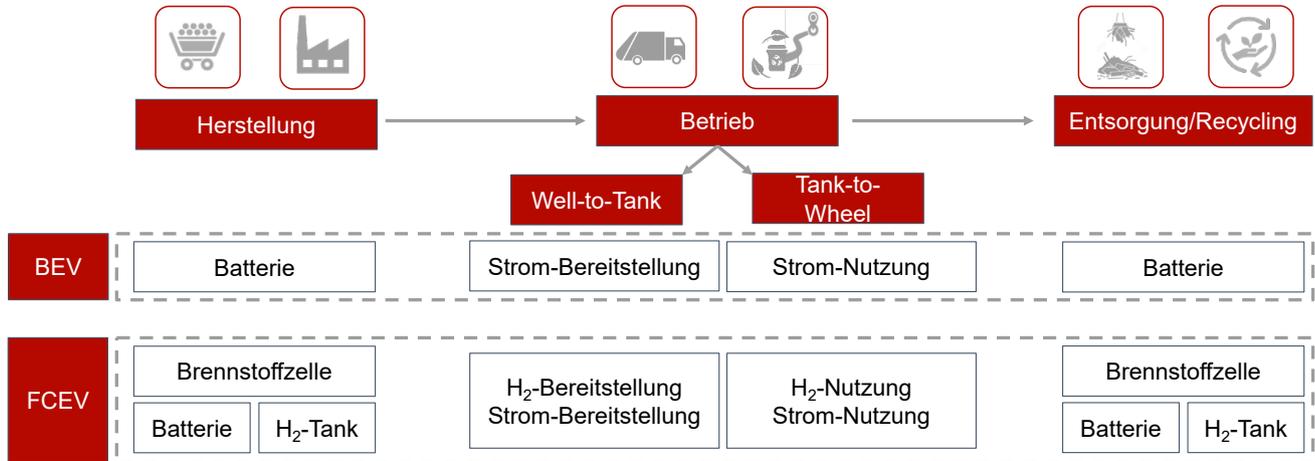


Abbildung 3: Ökobilanz für Abfallsammelfahrzeuge

Der mit Erdgas über die Dampfreformierung hergestellte Wasserstoff wird grauer Wasserstoff genannt und ist nicht klimaneutral, da dieser auf fossilen Brennstoffen basiert. Als grüner Wasserstoff wird hingegen der Wasserstoff bezeichnet, der durch die Elektrolyse klimaneutral erzeugt wird. Bei diesem Verfahren wird elektrischer Strom genutzt, um Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff zu spalten. In Tabelle 4 sind die Emissionswerte für alternative Antriebskonzepte aufgeführt.

	BEV	FCEV
Herstellung	Batterie 145 kgCO ₂ e/kWh	Wasserstofftank 475 kgCO ₂ e/kg Brennstoffzelle 30,5 kgCO ₂ e/kW
Einflussgrößen	<ul style="list-style-type: none"> • Batteriekapazität • gravimetrische Energiedichte 80 – 118 Wh/kg • Zellchemie • Energieeinsatz in der Zellfertigung 	<ul style="list-style-type: none"> • Leistungsdichte der Brennstoffzelle • Betriebspunkt • Platin-Beladung des Katalysators
Betrieb	<p>Stromerzeugung in Deutschland im Jahr 2020 0,366 kgCO₂/kWh</p> <p>Anteil erneuerbare Energien 47 %</p>	<p>Wasserstoffherzeugung mit deutschem Strommix</p> <ul style="list-style-type: none"> • Dampfreformierung: 13 kgCO₂/kg • Elektrolyse: 21 kgCO₂/kg <p>Wasserstoffherzeugung mit erneuerbaren Energien</p> <ul style="list-style-type: none"> • Elektrolyse: 2,98 kgCO₂e/kg
Recycling	Batterie 12 kgCO ₂ e/kWh	Brennstoffzelle 10 kgCO ₂ e/kW

Tabelle 4: Emissionsparameter für alternative Antriebskonzepte^{9,10,11,12,13}

2.6. Marktanalyse

Eine Vielzahl an Herstellern bieten mittlerweile Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge für die Abfallsammlung an. Aufgrund der Einführungsphase von alternativen Antriebskonzepten befinden sich die Modelle aktuell noch in einer Vorserie. Die Nutzer*innen bestimmen durch ihre Akzeptanz oder Ablehnung maßgeblich, wie sich die zukünftige Marktdiffusion entwickelt. Abbildung 4 beinhaltet die aktuellen Hersteller von Abfallsammelfahrzeugen mit alternativen Antriebstechnologien.



Abbildung 4: Hersteller von Abfallsammelfahrzeugen mit alternativen Antriebskonzepten

Mittlerweile werden in Deutschland eine geringe Anzahl an Abfallsammelfahrzeugen mit Alternativen Antriebskonzepten zur Abfallsammlung eingesetzt. Die Marktmodelle und eingesetzten Fahrzeuge unterscheiden sich deutlich hinsichtlich Kapazität und Reichweite, was auf den noch frühen Status des Markteintrittes zurückzuführen ist. In Abbildung 5 sind die Abfallsammelfahrzeuge mit alternativen Antriebskonzepten aufgeführt, die aktuell im Einsatz sind oder von oben genannten Herstellern angeboten werden. Da die Brennstoffzellen-Abfallsammelfahrzeuge meist als Range-Extender aufgebaut sind, wird die Energiespeicherkapazität von Batterie und Wasserstofftank zusammengefasst.

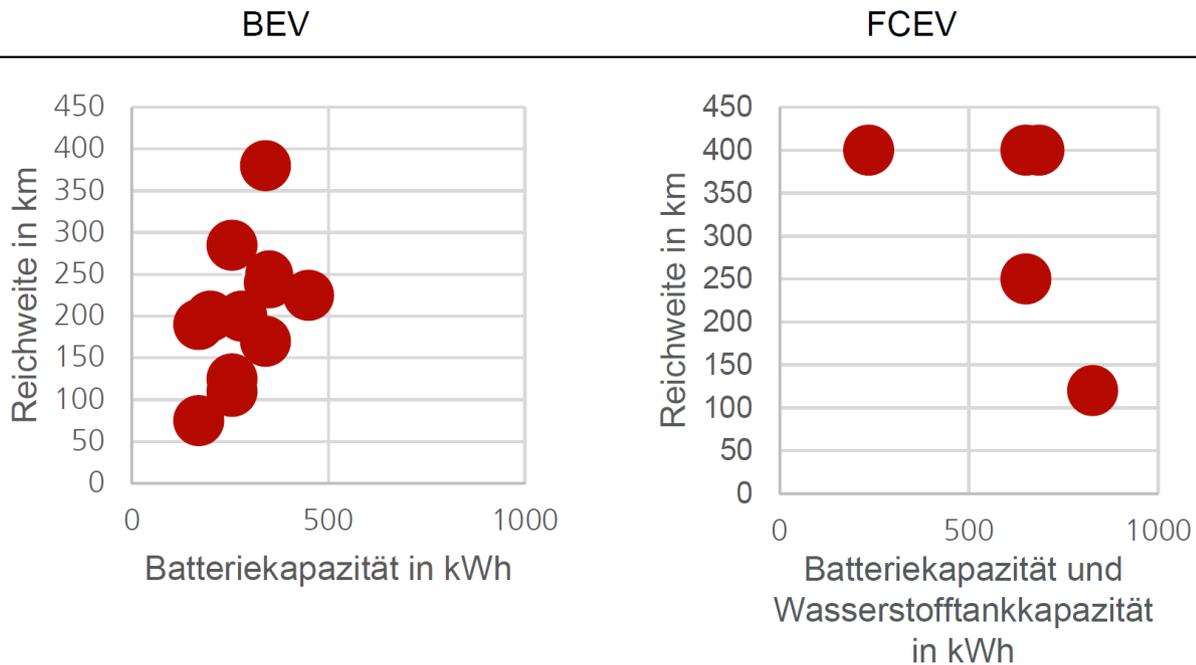


Abbildung 5: Fahrzeugdaten von Abfallsammelfahrzeugen mit alternativen Antriebskonzepten

3. Schritte zur Flottentransformation

Für eine erfolgreiche Umstellung der Flotte auf emissionsfreie Antriebskonzepte ist eine grundlegende Analyse der Anforderungen an das individuelle Abfallsammelfahrzeug notwendig. Die Analyse sollte alle relevante Bedingungen wie Mobilitäts- und Nutzerverhalten umfassen und dadurch die erfolgreiche Integration von alternativen Antriebskonzepten in den Fuhrpark sichern. Ziel ist die Ermittlung des Einsatzpotenzials alternativer Antriebskonzepte zur Deckung der Streckenprofile auf Grundlage einer ökonomischen und ökologischen Bilanzierung. In Abbildung 6 sind die Schritte zur Umstellung der Abfallsammelfahrzeuge auf alternative Antriebskonzepte aufgeführt, die die Grundlage für eine erfolgreiche Flottentransformation bilden und Baustein der Konzeptentwicklung sind.

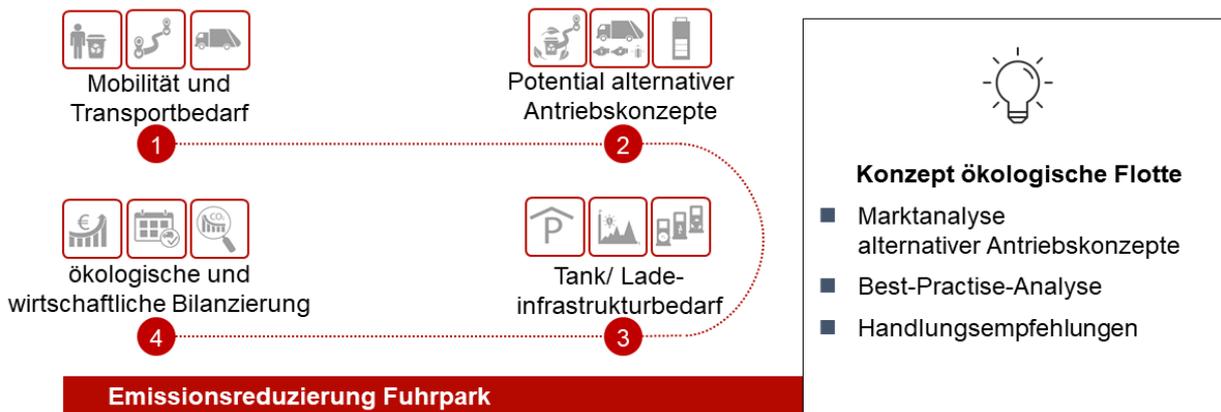


Abbildung 6: Schritte zur Flottentransformation

1. Mobilitätsverhalten und Transportbedarf

Abfallsammelfahrzeuge fahren in der Regel wiederkehrende Routen in Sammelgebieten ab. Die Jahreslaufleistungen liegen meist zwischen 10.000 bis 30.000 km und tägliche Fahrten zwischen 50 und 200 km. Die Fahrprofile von Abfallsammeltouren setzen sich aus Anfahrtsweg zum Sammelgebiet, Route durchs Sammelgebiet und abschließende Rückfahrt zum Betriebshof zusammen. Oftmals erfolgen zwei Sammeltouren pro Arbeitstag mit teils zwischenzeitlicher Rückkehr sowie Entladevorgang an der Abladestelle. Die Sammelzeit und Schüttzeit innerhalb des Sammelgebiets ist stark abhängig von vorhandener Siedlungsstruktur und Siedlungsgeographie. Urbane Verkehrsbehinderungen im städtischen Umfeld sowie Streusiedlungen im ländlichen Gebiet haben direkte Auswirkungen auf Zwischenfahrzeiten und Schüttzeiten. Für die Betriebszeit ist außerdem die einzusammelnde Behältergröße im Zusammenhang mit der Transportmenge relevant. Zur Charakterisierung der Bebauungsdichte von Siedlungen wird der Haltepunktfaktor genutzt, der das Verhältnis von Anzahl der Behälter pro Haltepunkt angibt. Aus Anfahrt zum Sammelgebiet, Topografie, Schüttzeit sowie Zwischenfahrzeit und Pausen resultiert eine Tagesverteilung des Mobilitätsbedarfs der Abfallsammlung, die anschließend mit alternativen Antriebskonzepten ohne Energiemängel gedeckt werden muss.

2. Potential alternativer Antriebskonzepte

Als größtes Hindernis werden von Flottenbetreiber*innen eine zu geringe Reichweite genannt. Aus der Analyse des Mobilitätsverhaltens und Transportbedarfs lässt sich das Potential alternativer Antriebskonzepte wie Batterie und Brennstoffzelle zur Deckung der Streckenprofile, ableiten. Die Anforderungen an die Antriebstechnologie orientieren sich hierbei immer an den maximalen Aufgaben für Tagesreichweite, Topografie und Nutzlast. Ziel ist den konventionellen Mobilitätsbedarf ohne eine Anpassung des Streckenprofils oder der Transportmenge zu gewährleisten. Je nach Streckenprofil können Empfehlungen für eine explizite Antriebstechnologie, Antriebsdimensionierung und notwendigen Batterie-/Tankkapazitäten ermittelt werden.

3. Tank- und Ladeinfrastrukturbedarf

Aus der Kombination von Antriebstechnologiewahl und dem zugrunde gelegten Streckenprofil resultiert der Energiebedarf für die Abfallsammelfahrzeuge. Aufgrund der neuen Antriebstechnologie ist die Verwendung und teils auch Installation einer neuen Tank- und Ladeinfrastruktur notwendig.

Für batterieelektrische Abfallsammelfahrzeuge empfiehlt sich der Aufbau einer Ladestation auf dem Betriebshof oder bereits vorhandene Ladestationen zu nutzen. Um den Ladevorgang nutzungsfreundlich zu gestalten und ein umständliches Umstecken zu verhindern, ist die Installation von einem Ladepunkt pro Abfallsammelfahrzeug zu empfehlen. Da die Abfallsammeltouren oftmals zeitnah enden, ist zu erwarten, dass die Ladevorgänge der Abfallsammelfahrzeuge zu ähnlichen Zeiten starten. Um Netzüberlastungen zu verhindern und eine bedarfsgerechte Netzintegration am Netzanschlusspunkt zu fördern ist je nach Standortauslastung ein Lastmanagement zu empfehlen. Ein höherer Gleichzeitigkeitsfaktor als bei Pkws ist bei den Ladevorgängen aufgrund ähnlichen Start- und Endzeitpunkten realistisch. Für das Nachladen sind je nach Batteriekapazität 22 bis 44 kW ausreichend. Zusätzlich bieten sich zwischenzeitliche Aufenthalte am Betriebshof für Zwischenladen mit einer Schnellladestation an.

Um den Wasserstoffbedarf von Brennstoffzellen-Abfallsammelfahrzeugen zu decken, bietet sich entweder die Installation einer Wasserstofftankstelle auf dem Betriebshof oder die Nutzung einer öffentlichen Wasserstofftankstelle in unmittelbarer Nähe des Betriebshofes an. Die öffentliche Wasserstofftankstelle in erreichbarer Nähe gewährleistet ohne Aufwand und Investitionskosten den Betrieb der Abfallsammelfahrzeuge. Jedoch sind aufgrund von Einschränkungen wie Zugänglichkeit oder individueller Betankungsdruck nicht alle öffentlichen Wasserstofftankstellen für die Betankung von Brennstoffzellen-Abfallsammelfahrzeugen geeignet.

4. Ökologische und wirtschaftliche Bilanzierung

Als letzten Schritt der Flottentransformation sieht die ökologische und wirtschaftliche Bilanzierung der Fahrzeug- und Infrastrukturoptionen eine Gegenüberstellung der konventionellen und alternativen Systeme vor, um die zuvor gewonnenen Erkenntnisse zu bündeln und die bestmögliche Lösung für die Anforderungen sicherzustellen. Unter Berücksichtigung der unternehmens- und standortspezifischen Voraussetzungen werden die Strategien auf CO₂-Einsparpotential und Gesamtkosten untersucht und bilanziert. Als Ergebnis resultieren die emissionsfreien Antriebskonzepte in Verbindung mit der notwendigen Infrastruktur und des Energiebezugs, die die zukünftigen Anforderungen einer klimafreundliche Abfalllogistik wirtschaftlich und ökologisch erfüllen. Aktuelle Förderprogramme für Nutzfahrzeuge mit alternativen Antriebskonzepten sowie Fahrzeugmodelle werden online auf <https://www.klimafreundliche-nutzfahrzeuge.de/> veröffentlicht.

Ihr Kontakt zu uns

- ▶ Ausführliche Informationen zum Mittelstand 4.0-Kompetenzzentrum Stuttgart, einen Einblick in unser gesamtes Themenspektrum und aktuelle Terminhinweise finden Sie unter: digitales-kompetenzzentrum-stuttgart.de.
- ▶ Sie haben eine konkrete Anfrage zum Themenfeld Mobilität? Senden Sie eine Mail an unseren Verantwortlichen. Er wird Ihre Anfrage an die entsprechenden Ansprechpartner/innen weiterleiten, die sich dann mit Ihnen in Verbindung setzen werden.



Felix Otteny

Verantwortlicher für das Thema „Mobilität“

mobilitaet@digitales-kompetenzzentrum-stuttgart.de

Wir freuen uns auf Ihre Anfrage und eine erfolgreiche Zusammenarbeit
Ihr Team vom Mittelstand 4.0-Kompetenzzentrum Stuttgart

Was ist Mittelstand-Digital?

Mittelstand-Digital informiert kleine und mittlere Unternehmen über die Chancen und Herausforderungen der Digitalisierung. Die geförderten Kompetenzzentren helfen mit Expertenwissen, Demonstrationszentren, Best-Practice-Beispielen sowie Netzwerken, die dem Erfahrungsaustausch dienen. Das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) ermöglicht die kostenfreie Nutzung aller Angebote von Mittelstand-Digital. Der DLR Projektträger begleitet im Auftrag des BMWi die Kompetenzzentren fachlich und sorgt für eine bedarfs- und mittelstandsgerechte Umsetzung der Angebote. Das Wissenschaftliche Institut für Infrastruktur und Kommunikationsdienste (WIK) unterstützt mit wissenschaftlicher Begleitung, Vernetzung und Öffentlichkeitsarbeit. Weitere Informationen finden Sie unter www.mittelstand-digital.de.

Quellenverzeichnis

- 1** Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur 2021; Bundesverband der Deutschen Entsorgungs-, Wasser- und Rohstoffwirtschaft e. V.: Statusbericht der deutschen Kreislaufwirtschaft 2020, 2020.
- 2** Verband kommunaler Unternehmen e.V.: Abfallwirtschaft; Bundesverband der Deutschen Entsorgungs-, Wasser- und Rohstoffwirtschaft e. V.: Statusbericht der deutschen Kreislaufwirtschaft 2020, 2020.
- 3** Bundesverband der Deutschen Entsorgungs-, Wasser- und Rohstoffwirtschaft e. V.: Statusbericht der deutschen Kreislaufwirtschaft 2020, 2020.
- 4** Agora Verkehrswende: Technologieneutralität im Kontext der Verkehrswende, 2020.
- 5** Nationale Plattform Zukunft der Mobilität - NPM: Infrastruktur für Wasserstoffmobilität - AG 5, 2021.
- 6** Krafftahrt-Bundesamt: Fahrzeuge, 2021.
- 7** e-mobil BW: Studie: Nullemissions-Nutzfahrzeuge, 2018.
- 8** H2 Mobility: Wasserstofftanken im Schwerlastverkehr, 2021.
- 9** Institut für Energie- und Umweltforschung, Agora Verkehrswende: Klimabilanz von Elektroautos, 2019.
- 10** Fraunhofer ISE: Treibhausgas-Emissionen für Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge, 2019.
- 11** e-mobil BW: Studie: Nullemissions-Nutzfahrzeuge, 2018.
- 12** e-mobil BW: Rohstoffe für innovative Fahrzeugtechnologien, 2019.
- 13** Statistisches Bundesamt: Energieerzeugung, 2021.

Bildnachweis

Titelseite:

484189251 © PeopleImages

Seite : 8

© Felix Otteny Fraunhofer IAO

Seite : 12

© Felix Otteny Fraunhofer IAO

Seite : 15

© Felix Otteny Fraunhofer IAO

Seite : 17

© Felix Otteny Fraunhofer IAO

Seite : 18

© Felix Otteny Fraunhofer IAO

Seite : 19

© Felix Otteny Fraunhofer IAO

Zur übersichtlicheren Darstellung wurde in den dargestellten Grafiken nur die maskuline Form verwendet. Selbstverständlich sind damit alle Geschlechter gemeint.

Impressum

Herausgeber

Mittelstand 4.0-Kompetenzzentrum Stuttgart
c/o Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO
Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Autoren

Felix Otteny, Fraunhofer IAO

Rechtsform

Das Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO ist eine rechtlich nicht selbständige Einrichtung der Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V.
Hansastraße 27 c
80686 München
Telefon: +49 89 1205-0
Fax: +49 89 1205-7531
www.fraunhofer.de

Druck

Fraunhofer Verlag
Mediendienstleistungen
Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Stand

November 2021

