

Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL), Kanton Zürich

Marktstudie und Potenzialabschätzung «Elektrifizierte Non-Road- Maschinen»

Schlussbericht
Zürich/Bern, 15. Juli 2024

Benedikt Notter
Sophie Bogler

Impressum

Marktstudie und Potenzialabschätzung «Elektrifizierte Non-Road-Maschinen»

Zürich/Bern, 15. Juli 2024

Elektrische_Non-Road-Maschinen_AWEL_Schlussbericht.docx

Auftraggeber

Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL), Kanton Zürich

Projektleitung

Cuno Bieler

Autorinnen und Autoren

Benedikt Notter

Sophie Bogler

INFRAS, Sennweg 2, 3012 Bern

Tel. +41 31 370 19 19

info@infras.ch

Begleitgruppe

Cuno Bieler (AWEL, Kanton Zürich)

Urs Eggenberger (AWEL, Kanton Zürich)

Beat Gloor (AWEL, Kanton Zürich)

Thomas Stoiber (AWEL, Kanton Zürich)

Marco Landis (Strickhof, Kanton Zürich)

Raphael Bernet (Strickhof, Kanton Zürich)

Igor Grcic (Bucher Municipal)

Marcel Braem (Tiefbauamt, Stadt Zürich)

Jeannot Wagner (Tiefbauamt, Kanton Zürich)

Therese Fankhauser (Stadt Zürich, Hochbaudepartment)

Marco Meier (Ecoforce)

Inhalt

Impressum	2
Inhalt	3
Zusammenfassung	5
Ausgangslage und Auftrag	5
Marktanalyse	5
Mengengerüst heute	7
Substitutions- und Reduktionspotenzial bis 2030	8
Fördermassnahmen	10
1. Einführung	12
1.1. Ausgangslage und Auftrag	12
1.2. Begriff Non-Road-Maschinen	13
2. Vorgehen	13
2.1. AP 1 Marktanalyse	13
2.2. AP 2 Mengengerüst heute	18
2.3. AP 3 Substitutions- und Reduktionspotenzial bis 2030	19
2.4. AP 4 Entwicklung Fördermassnahmen zur Dekarbonisierung	24
3. Resultate	26
3.1. AP 1 Marktanalyse	26
3.2. AP 2 Mengengerüst heute	41
3.3. AP 3 Substitutions- und Reduktionspotenzial bis 2030	43
3.4. AP 4 Entwicklung Fördermassnahmen zur Dekarbonisierung	47
Annex	64
A1. Marktanalyse: Befragung	64
A2. Marktanalyse: Internetrecherche	80
A3. Mengengerüst	87

A5. Fördermassnahmen	91
Glossar	92
Literatur	93

Zusammenfassung

Ausgangslage und Auftrag

Der Massnahmenplan Klima des Kantons Zürich (AWEL 2018) beinhaltet als Massnahme IE2 die «Förderung des Einsatzes von elektrisch betriebenen Industrie-, Bau- und Landwirtschaftsmaschinen», mit der heute fossil betriebene mobile Arbeitsmaschinen durch elektrische Alternativen ersetzt werden sollen.

Die vorliegende Studie dient als Grundlage zur Entwicklung von Massnahmen zur Förderung des Einsatzes solcher elektrischer «Non-Road-Maschinen» (der Begriff ist an die Nomenklatur der Europäischen Kommission angelehnt, welche diese Maschinen unter dem Begriff «Non-road mobile machinery», abgekürzt NRMM, zusammenfasst). Gegenstand der Studie sind Maschinen der Gattungen Industrie, Baumaschinen und Landwirtschaft (z.B. Gabelstapler, Bagger oder Traktoren) ab einer Nennleistung von 5 kW. Der Studienauftrag beinhaltet:

- Durchführung einer **Marktanalyse** zur aktuellen Verfügbarkeit von Maschinen verschiedener Antriebstechnologien sowie zur Einholung von Einschätzungen von Herstellern und Anwendern zu deren Elektrifizierungspotential;
- Herleitung eines **aktuellen Mengengerüsts** entsprechender Maschinen im Kanton Zürich;
- Abschätzung des **Substitutionspotenzials** konventioneller Antriebstechnologien mit emissionsfreien oder -armen Antrieben und dessen **Reduktionspotenzial** hinsichtlich Energieverbrauch, CO₂- und Luftschadstoffemissionen;
- Sammlung, Beschrieb und Bewertung möglicher **Fördermassnahmen** für elektrische Maschinen unter Einbezug von Stakeholdern aus dem Kanton Zürich.

Gemäss Auftrag liegt der Fokus der Studie auf der **Elektrifizierung** von Non-Road-Maschinen. Andere Optionen zur Dekarbonisierung (technische Optionen wie z.B. Wasserstoff-Verbrennungsmotoren oder der Einsatz biogener oder synthetischer Treibstoffe, oder betriebliche Optionen zur Effizienzerhöhung durch die Bedienung der Maschinen, oder durch Optimierung oder Veränderung von Arbeitsprozessen) werden mitbetrachtet, stehen aber nicht im Fokus der Studie.

Marktanalyse

Der **Grossteil der Non-Road-Maschinen wird heute noch mit fossilen Antrieben (Benzin/Diesel) betrieben**. **Batterie-elektrische Antriebe** sind die häufigste alternative Antriebsform, machen aber noch einen **geringen Anteil des heutigen Marktangebots** (niedriger einstelliger Prozentbereich) aus. Gabelstapler werden als einzige Maschinenkategorie traditionell zu einem Grossteil (fast 80%, Einsatz oft in Lagerhallen/Innenräumen) elektrisch betrieben. Ausserdem

weisen im Kommunalbereich eingesetzte Maschinen kleinerer Grössenklassen (bis 75 kW) einen batterieelektrischen Marktanteil von über 50% auf.

Eine Liste heute kommerziell verfügbarer oder sich als Prototypen/Pilotprojekte in Entwicklung befindender elektrischer Maschinen (ohne Anspruch auf Vollständigkeit) ist im Anhang A2 dieses Berichts zu finden.

Als **Vorteil** elektrischer Maschinen wird wahrgenommen, dass

- Klima-, Luft- und Lärmbelastung im Betrieb vollständig oder zu einem grossen Teil entfallen;
- Geltende oder allfällige zukünftige Regulationen in diesen Bereichen somit eingehalten werden können;
- elektrische betriebene Maschinen im Betrieb günstiger sind.

Nachteilig bzw. als Hindernis für eine Substitution wird hingegen wahrgenommen, dass

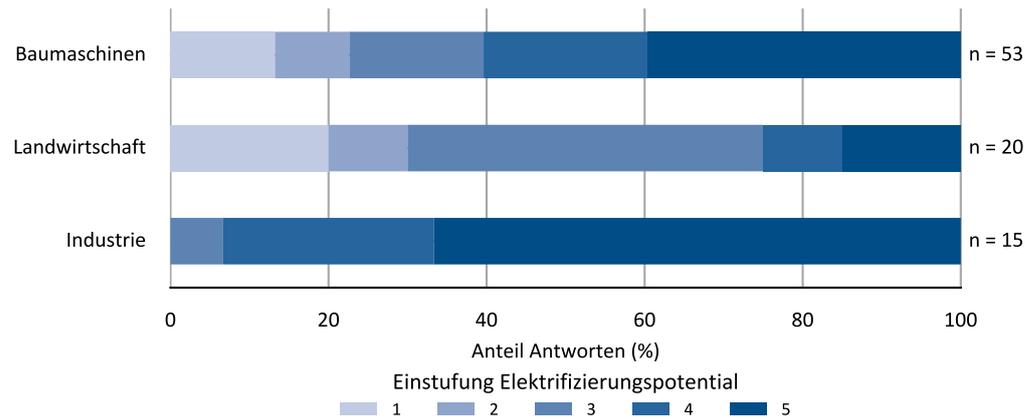
- die Batterieladung nicht für lange Arbeitsdauern, v.a. grosser Maschinen, ausreicht, und dass die Ladezeiten zu lange sind;
- die Ladeinfrastruktur zu teuer und zu kompliziert in der Bereitstellung ist;
- die Anschaffungskosten zu hoch sind, Erfahrungen zu Betriebskosten fehlen, und der Wiederverkaufswert unsicher ist.

Es wird erwartet, dass batterieelektrische Antriebe **bis 2030** die am besten verfügbaren alternativen Technologien sind. Nach Sektoren sind Non-Road-Maschinen in der Industrie (beinhaltet auch den Kommunalbereich) am einfachsten elektrifizierbar, gefolgt von der Bauwirtschaft; am grössten sind die Herausforderungen in der Land- und Forstwirtschaft (s. Abbildung 1). Weiter wird hinsichtlich der Entwicklung bis 2030 erwartet:

- Vor allem bei kleineren Maschinen (bis ca. 37 kW, je nach Gattung bis 75 kW) sowie bei v.a. stationär oder in Innenräumen angewendeten Maschinen werden elektrische Antriebe bis 2030 breit kommerziell verfügbar sein.
- Für einzelne grössere Maschinentypen werden ebenfalls elektrische Modelle kommerziell verfügbar, v.a. wo ein grosses Energie-Rekuperationspotenzial besteht (z.B. Bagger, Dumper).
- Für andere grössere Maschinen, insbesondere solche, die weitab von Ladeinfrastruktur zum Einsatz kommen – d.h. v.a. in der Land- und Forstwirtschaft – werden bis 2030 noch kaum kommerzielle alternativ angetriebene Angebote verfügbar sein. Wasserstoffmotoren, Brennstoffzellen, oder Gasmotoren werden bis dahin v.a. als Prototypen getestet und entwickelt werden.

- Ladelösungen wie grosse Battery packs, Schnelllade- und Batteriewechselstationen, Batteries as a service) werden breiter verfügbar.

Abbildung 1: Einstufung des Elektrifizierungspotentials bis 2030 für batterieelektrische Non-Road-Maschinen nach Maschinengattung. Skala von 1 bis 5 mit 5 als Höchstwert für das Elektrifizierungspotential.



Grafik INFRAS. Quelle: Befragung AP 1.

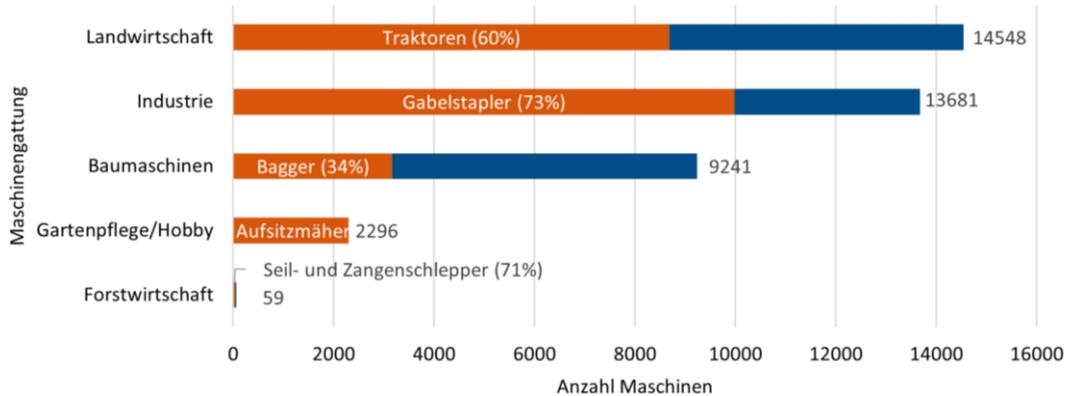
Mengengerüst heute

Das **Mengengerüst** der betrachteten Non-Road-Maschinen im Kanton Zürich umfasst 2023 rund 40'000 Maschinen, wobei Landwirtschaft, Industrie und Bauwirtschaft den grössten Teil des Bestandes ausmachen (Abbildung 2a). In jeder Maschinengattung stellt eine dominante Maschinenkategorie mindestens ein Drittel des Bestandes – in der Landwirtschaft sind es die Traktoren, in der Industrie die Gabelstapler und bei den Baumaschinen die Bagger.

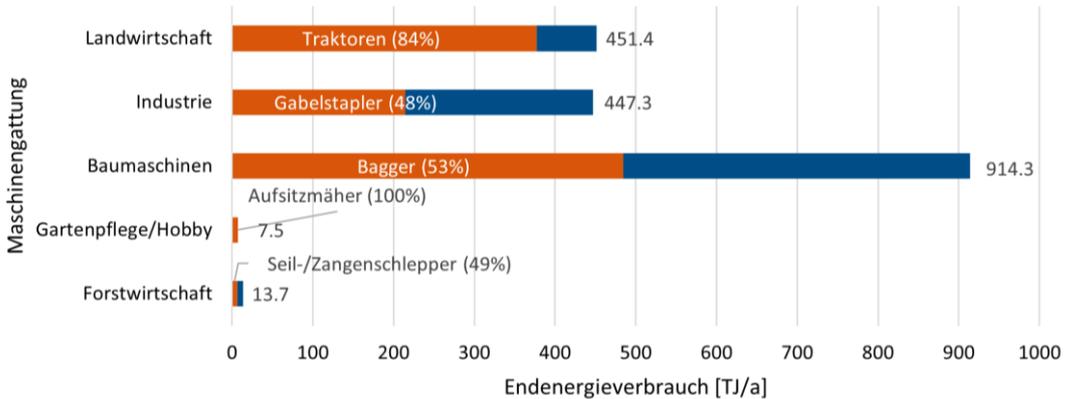
Der Energieverbrauch der betrachteten Maschinen im Jahr 2023 wird auf 1.8 PJ geschätzt (Abbildung 2b). Während die Landmaschinen den grössten Bestandesanteil aller Gattungen stellen, dominieren die Baumaschinen den Energieverbrauch mit rund 0.9 PJ. Dies liegt v.a. an den hohen jährlichen Betriebsstunden pro Maschine im Vergleich mit den anderen Gattungen.

Abbildung 2: Mengengerüst der betrachteten Non-Road-Maschinen im Kanton Zürich hinsichtlich Bestand (oben) und Energieverbrauch (unten). Die dominante Maschinenkategorie pro Gattung ist in orange dargestellt, der Rest der Maschinen in blau.

a) Bestand



b) Endenergieverbrauch



Grafik INFRAS. Quelle: Eigene Berechnungen.

Substitutions- und Reduktionspotenzial bis 2030

Die betrachteten Szenarien zum **Substitutions- und Reduktionspotenzial bis 2030** zeigen, dass aufgrund

- des bis 2030 noch relativ gering erwarteten Marktanteils elektrischer Maschinen v.a. in den höheren Leistungsklassen, und
- der verzögerten Reaktion des Maschinenbestandes auf Veränderungen bei den Neuzugängen

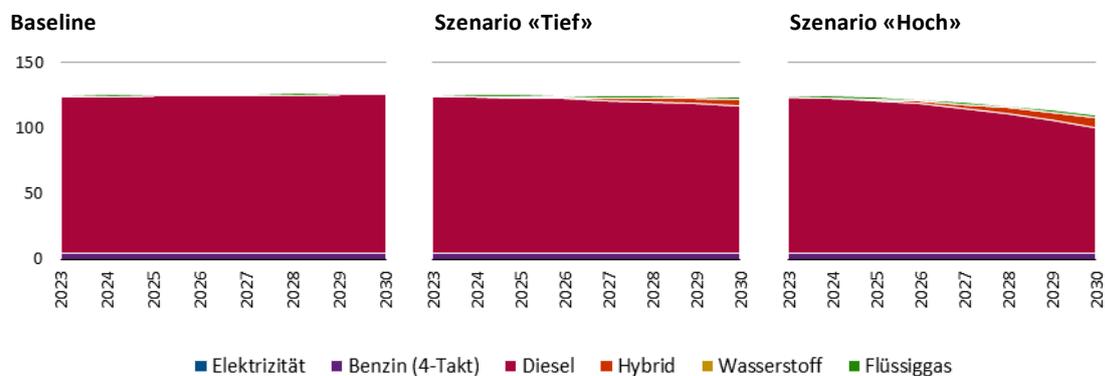
die Dekarbonisierung bis 2030 noch relativ geringe Auswirkungen auf die Zusammensetzung der Maschinenflotte haben wird. Dies gilt auch für Energieverbrauch und Emissionen. Die

Auswirkungen der Dekarbonisierung werden ihre volle Wirksamkeit erst später, d.h. ausserhalb des betrachteten Zeitrahmens, entfalten.

So nimmt der elektrisch betriebene Anteil im Szenario «Tief» (welches der voraussichtlichen kommerzielle Verfügbarkeit neuer Technologien ohne Fördermassnahmen entspricht) der elektrisch betriebene Bestandesanteil nur um ca. 2% gegenüber heute zu, und im Szenario «Hoch» (welches eine hohe plausible Adoptionsrate neuer Antriebstechnologien mit Fördermassnahmen und hoher Akzeptanz unterstellt) um gut 6%. Der Endenergieverbrauch nimmt dementsprechend um ca. 2% (Szenario «Tief») bis knapp 9% (Szenario «Hoch») ab.

Bei den CO₂-Emissionen ist die Einsparung mit knapp 2% (Szenario «Tief») bis fast 14% (Szenario «Hoch») relativ gesehen etwas höher, da die elektrischen Maschinen im Betrieb gar kein CO₂ ausstossen (Abbildung 3). Und bei den Luftschadstoff-Emissionen fällt die Reduktion teilweise sogar noch etwas deutlicher aus – 4% bis 19% bei den Stickoxiden (NO_x) und 4% - 11% beim Feinstaub (PM10) aus dem Auspuff – da v.a. die kleinen Maschinen elektrifiziert werden, welche weniger strenge Emissionsgrenzwerte einhalten müssen und daher höhere Emissionen pro geleistete Arbeit aufweisen als die grösseren Maschinen.

Abbildung 3: CO₂-Emissionen [1000 t/a] nach Antriebstechnologien im Szenarienvergleich, 2023-2030.



Grafik INFRAS. Quelle: Eigene Berechnungen

Zu beachten ist, dass ein Ersatz von Diesel mit synthetischen Treibstoffen (z.B. HVO) in diesen Szenarien nicht mitbetrachtet wurde. Da die relative CO₂-Einsparung 1:1 dem durch HVO ersetzten Dieselanteil entsprechen würde, würde eine Modellierung keinen Erkenntnisgewinn bringen; ausserdem steht die Förderung von HVO bei den Fördermassnahmen nicht im Fokus (s. unten).

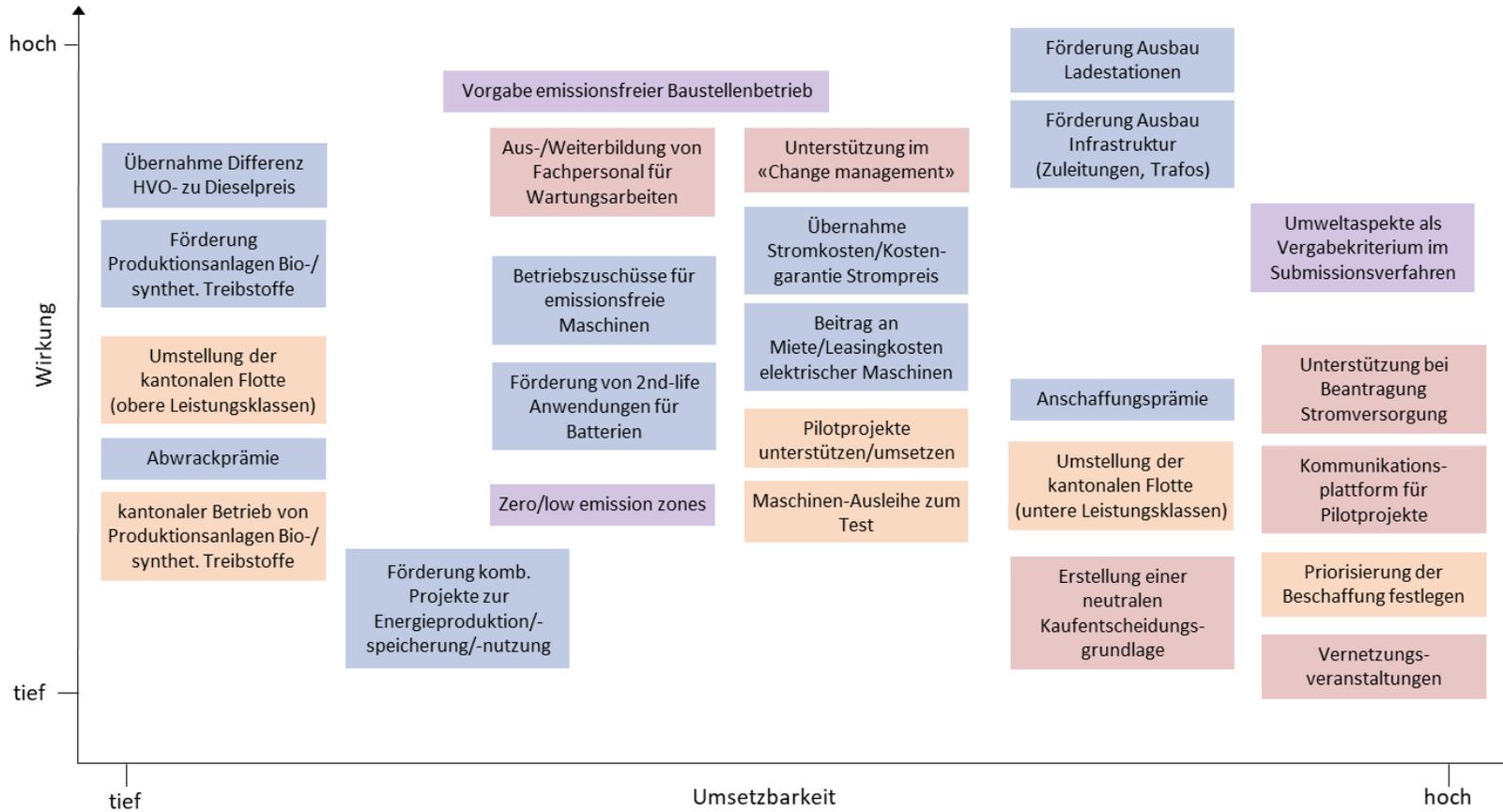
Fördermassnahmen

Basierend auf der Befragung im Rahmen der Marktanalyse (s. oben) sowie einer Literatur- und Webrecherche wurden mögliche Fördermassnahmen für die Elektrifizierung von Non-Road-Maschinen gesammelt. Diese Sammlung wurde an einem Workshop mit Stakeholdern aus der kantonalen Verwaltung sowie Maschinenherstellern und -Anwendern ergänzt und bewertet. Die rund 25 nach Wirkung und Umsetzbarkeit bewerteten Fördermassnahmen aus verschiedenen Handlungsfeldern sind in Abbildung 4 dargestellt.

Die folgenden Stossrichtungen werden sowohl von den Workshop-Teilnehmenden wie auch von INFRAS mehrere Stossrichtungen als zentral bewertet:

- **Förderung des Ausbaus der Ladeinfrastruktur** (mittels finanzieller und Know-How-Unterstützung und Ausbildung von Fachpersonal): Die fehlende Infrastruktur wird als eines der Haupthindernisse der Elektrifizierung wahrgenommen – der Kanton kann helfen, dieses zu überwinden. Gerade die Förderung von Grundinstallationen (d.h. Zuleitungen, ggf. Trafos) verspricht Multiplikator-Effekte: Die Kosten für die Grundinstallation können anfangs typischerweise erst auf wenige Maschinen aufgeteilt werden – ist sie jedoch vorhanden, können leicht Ladestationen für zusätzliche Maschinen hinzuiinstalliert werden.
- **Förderung von Beratungs- und Ausbildungsangeboten**, die Nutzer:innen aktiv beim Umstellungsprozess ihrer Maschinenflotte auf alternative Antriebstechnologien unterstützen («Change management»). Gleichzeitig nimmt **der Kanton mit der Aufgabe, die eigene Flotte umzustellen, eine Vorbildfunktion ein**, um die Machbarkeit der Elektrifizierung aufzuzeigen und Erfahrungswerte aus dem Betrieb der Maschinen sammeln. Ohne Unterstützung und Zugang zu Erfahrungswerten bleiben viele Nutzer:innen zögerlich, eine Umstellung zu wagen. Dies gilt auch dann, wenn marktseitig Angebote für elektrische Maschinen vorhanden wären.
- **Umweltaspekte als Vergabekriterium in Submissionsverfahren für Bauprojekte**: Diese in Norwegen bereits erfolgreich eingeführte Massnahme beschleunigt die Elektrifizierung der Baumaschinen, welche den höchsten Energieverbrauch und CO₂-Emissionen der betrachteten Non-Road-Maschinengattungen verursachen.

Abbildung 4: Bewertung der gesammelten Fördermassnahmen nach Wirkung und Umsetzbarkeit.



Handlungsfelder in Farben: Finanzierung | Regulierung | Projekt-/Wissensunterstützung | Vorbild Kanton

Grafik INFRAS. Quellen: Workshop vom 22.05.2024, Einschätzung INFRAS.

1. Einführung

1.1. Ausgangslage und Auftrag

Im Jahr 2018 hat der Kanton Zürich den Massnahmenplan Klima verabschiedet, der verschiedene Massnahmen zur Reduktion von Treibhausgasemissionen beinhaltet (AWEL 2018). Eine der Massnahmen (IE2) zielt auf die «Förderung des Einsatzes von elektrisch betriebenen Industrie-, Bau- und Landwirtschaftsmaschinen» ab, mit der heute dieselbetriebene Maschinen durch analoge elektrische Alternativen ersetzt werden sollen.

Um ein Konzept mit Massnahmen zur Begünstigung des Einsatzes solcher Non-Road-Maschinen (Begriffserklärung in Kapitel 1.2) zu entwickeln, wurde INFRAS mit der Durchführung einer Marktanalyse zum heutigen Stand der Technik und einer Potentialabschätzung für die Substitution mit elektrischen Maschinen beauftragt. Der Studienauftrag wird in vier Arbeitspakete unterteilt:

- In **Arbeitspaket 1** wird für eine **Marktanalyse** mittels einer Befragung von Akteuren aus dem Non-Road-Maschinensektor der Schweiz durchgeführt. Ziel ist es, maschinenspezifische Auskünfte zum aktuellen Stand der Antriebstechnologien und Einschätzungen über ihr Elektrifizierungspotential zu erhalten. Ergänzt wird die Befragung mit einer Internetrecherche zum aktuellen Marktangebot elektrischer Non-Road-Maschinen in der Schweiz und Europa.
- In **Arbeitspaket 2** wird ein **Mengengerüst der heutigen Non-Road-Maschinenbestände im Kanton Zürich** hergeleitet. Ausgehend vom Mengengerüst des gesamtschweizerischen Emissionsinventars (BAFU 2015, INFRAS 2015) werden die Bestände auf den Anteil des Kantons Zürich skaliert. Bestände von Maschinenkategorien mit einem hohen Anteil strassenzugelassener Fahrzeuge werden mit den Fahrzeugregistrierungen aus dem Informationssystem Verkehrszulassung (IVZ) aktualisiert.
- Aufbauend auf den Ergebnissen der ersten beiden Arbeitspakete wird in **Arbeitspaket 3** einerseits das **Substitutionspotenzial** abgeschätzt, also wie hoch der Anteil der elektrisch oder mit alternativen Antrieben betriebenen Non-Road-Maschinen im Kanton Zürich bis zum Jahr 2030 sein könnte, und darauf basierend das **Reduktionspotenzial** hinsichtlich Endenergieverbrauch sowie CO₂- und Luftschadstoffemissionen (Stickoxide, Feinstaub) aus dem Maschinenbetrieb. Dabei werden zwei Szenarien mit dem Baseline-Szenario, das auf der Fortsetzung der konventionellen Antriebe basiert, verglichen. Im Szenario «tief» basiert das Potenzial auf der voraussichtlichen kommerziellen Verfügbarkeit neuer Antriebsformen ohne Fördermassnahmen. Demgegenüber geht das Szenario «hoch» von hohen plausiblen Adoptionsraten neuer Antriebsformen aus, die durch Massnahmen gefördert werden und auf einer hohen Akzeptanz beruhen. Aus der Entwicklung des Mengengerüsts bis 2030 wird letztlich das

Emissionsreduktionspotenzial auf Basis der Emissionsfaktoren gemäss Schweizer Non-Road-Emissionsinventar (BAFU 2015) abgeleitet.

- Im **Arbeitspaket 4** werden Vorschläge für mögliche Massnahmen und Anreize zur Förderung der Elektrifizierung der Non-Road-Maschinen im Kanton Zürich entwickelt. Der Fokus liegt auf Massnahmen, die auf kantonaler Ebene umgesetzt werden können.

Der vorliegende Bericht fokussiert gemäss Auftrag auf die **Elektrifizierung** von Non-Road-Maschinen. Andere technische Optionen zur Dekarbonisierung (wie z.B. Wasserstoff-Verbrennungsmotoren oder der Einsatz biogener oder synthetischer Treibstoffe) werden mitbetrachtet, stehen aber nicht im Fokus der Studie.

1.2. Begriff Non-Road-Maschinen

Der Begriff Non-Road-Maschinen umfasst eine Vielzahl verschiedener Fahrzeuge und mobiler Maschinen, die nicht hauptsächlich zum Transport von Personen oder Gütern, sondern für die Verrichtung verschiedener Arbeiten eingesetzt werden. Der Begriff «Non-Road-Maschinen» ist an die Nomenklatur der Europäischen Kommission (EC) angelehnt, welche diese Maschinen unter dem Begriff «Non-road mobile machinery» (abgekürzt NRMM) zusammenfasst (EC 2014).

Zur Klassifizierung dieses Maschinensektors nutzen wir für die Studie die Maschinengattungen und -kategorien des schweizerischen Non-Road-Emissionsinventars des BAFU (BAFU 2015). In der aktuellen Studie liegt der Fokus insbesondere auf mobilen Maschinen der Gattungen Industrie, Baumaschinen und Landwirtschaft, da sie die grössten Bestände aufweisen. Darunter fallen z.B. Gabelstapler, Bagger und Traktoren. Ergänzend werden Maschinen der Gattungen Forstwirtschaft und Gartenpflege/Hobby (i.e. Aufsitzmäher) berücksichtigt. In allen Gattungen werden Maschinen ab einer Leistung von 5 kW miteinbezogen. Sonstige Maschinengattungen der Non-Road-Datenbank (kleine/handgehaltene Geräte v.a. aus Gartenpflege/Hobby, Schiffe, Schienen- und Militärfahrzeuge) fallen ausserhalb des Untersuchungsumfangs der Studie.

2. Vorgehen

2.1. AP 1 Marktanalyse

Für die Marktanalyse des Non-Road-Maschinensektors in der Schweiz des AP 1 wird eine Befragung von Akteuren im Sektor durchgeführt (Kapitel 2.1.1) sowie eine Internetrecherche zum aktuellen Angebot in der Schweiz von Maschinen mit alternativen Antriebstechnologien (Kapitel 2.1.2).

2.1.1. Befragung

Auswahl der Akteure

Die Auswahl zu befragender Akteure aus dem Non-Road Maschinensektor der Schweiz erfolgte auf Basis einer Internetrecherche sowie unter Verwendung der Sammlung bisheriger Kontakte von INFRAS aus verschiedenen Studien zum Non-Road-Sektor. Bei der Recherche wurde auf eine möglichst breite Abdeckung sämtlicher relevanter Maschinengattungen (Kapitel 1.2) geachtet. Ausserdem wurden Akteure mit verschiedenen Rollen in der Branche kontaktiert, insbesondere Vertriebspartner, Hersteller:innen und Anwender:innen der Maschinen sowie Expert:innen aus der Wissenschaft. Insgesamt wurden 93 verschiedene Akteure telefonisch oder per E-Mail kontaktiert. Nach der ersten Kontaktaufnahme wurden im Abstand von mehreren Wochen zusätzlich zwei Erinnerungsmails verschickt, um erneut zur Teilnahme anzuregen.

Konzeption des Fragenkatalogs

Der Fragebogen (siehe Screenshots im Anhang, Abbildung 22 bis Abbildung 29) wurde so konzipiert, dass die Teilnehmenden je nach Wissen auf verschiedenen Detaillierungsebenen Auskunft geben konnten: Sie konnten entweder allgemein zu ganzen Maschinengattungen (z.B. Baumaschinen, Landmaschinen etc.) Auskunft geben, bestimmte Maschinenkategorien (z.B. Traktoren, Raupenbagger etc.) auswählen, oder ihre Auskünfte auf bestimmte Grössen- bzw. Leistungsklassen eingrenzen.

Zu Beginn der Befragung wählten die Teilnehmenden aus vordefinierten Listen die Maschinenkategorien sowie ihre zugehörigen Leistungsklassen und Einsatzorte aus, zu denen sie Angaben machen konnten. Dabei wurde darauf hingewiesen, dass die Auswahl insbesondere die Unterschiede im Elektrifizierungspotential der Maschinen verdeutlichen sollte. Die zur Auswahl stehenden Maschinenkategorien jeder Maschinengattung entsprachen dabei dem Aufbau der Non-Road-Datenbank, so dass eine gute Verknüpfung der Antworten mit den Arbeitsschritten in AP 2 und 3 möglich ist. Trotz der hinterlegten Listen zur Auswahl der Maschinenkategorien sowie zur Beantwortung weiterer Fragen im Katalog war es bei jedem Eintrag zulässig, auch frei formulierte Antworten zu geben sowie Fragen unbeantwortet zu lassen. Auch übergeordnete Auskünfte zu allen Maschinen einer Gattung waren möglich. So wurde die Flexibilität bei der Beantwortung gewährleistet.

Für jede gewählte Kombination aus Maschinenkategorie, Leistungsklasse und Einsatzort analysierten die Teilnehmenden zunächst das heutige Elektrifizierungspotential – basierend auf Fragen zur Verfügbarkeit alternativer Antriebe, zu Umsetzungsoptionen der Elektrifizierung im Betrieb, sowie einer Auflistung von je bis zu fünf Vor- und Nachteilen der Elektrifizierung, die nach ihrer Wichtigkeit geordnet wurden. Bei der Auswahl der alternativen Antriebe lag der Schwerpunkt auf (teil-)elektrischen Technologien (batterieelektrisch, kabelelektrisch, Hybrid-

Antriebe), allerdings wurden auch Antworten wie z.B. die Brennstoffzelle mit aufgenommen. Darauf aufbauend befasste sich der zweite Abschnitt des Fragenkatalogs mit der Entwicklung des Elektrifizierungspotentials bis 2030, einschließlich einer qualitativen Einstufung des Potentials verschiedener (teil-)elektrischer Antriebstechnologien und einer Prognose ihrer Marktanteile bis 2030. Abschließend hatten die Teilnehmenden die Möglichkeit, Empfehlungen für Fördermassnahmen zur Bewältigung der Herausforderungen bei der Elektrifizierung von Non-Road-Maschinen abzugeben.

Die Teilnahme an der Befragung erfolgte primär schriftlich in Excel. Mit ausgewählten Akteuren, die besonders breite Auskünfte geben konnten, führten wir zur Ergänzung telefonische Interviews. Der Fragenkatalog diente in diesem Fall als Gesprächsleitfaden.

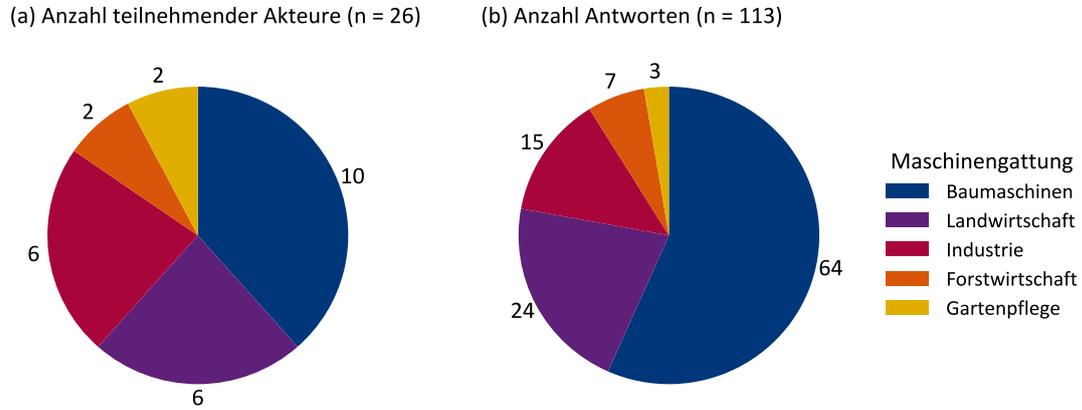
Rücklauf und Auswertung

Im Befragungszeitraum zwischen Juni und August 2023 erhielten wir von 23 der 93 kontaktierten Akteure Antworten auf die Befragung. Dies entspricht einer Rücklaufquote von etwa 25%. Mit sieben dieser Akteure führten wir vertiefte, telefonische Interviews. Von den restlichen Akteuren erhielten wir eine Absage oder Weiterleitung (39 Akteure) oder keine Rückmeldung (31 Akteure).

Die meisten Teilnehmenden beschrieben ihre Rolle im Non-Road-Maschinensektor entweder als Anwender der Maschinen (n = 9) oder als Vertriebspartner (n = 6), einzelne Auskünfte erhielten wir auch von Beratern mit breiten Tätigkeiten, einem Hersteller, sowie einem Experten aus der Wissenschaft. Detaillierte Informationen zu den einzelnen teilnehmenden Akteuren sind im Anhang gelistet (Tabelle 11).

Über alle Antworten hinweg ist die Maschinengattung der Baumaschinen am stärksten vertreten. Dies zeigt sowohl die Verteilung der Akteure nach Maschinengattung als auch die Anzahl einzelner Antworten pro Maschinengattung, von denen mehr als die Hälfte auf Baumaschinen entfallen (Abbildung 5). Die allgemeine Aussagekraft der Befragungsergebnisse bezieht sich damit besonders auf diese Maschinengattung. Die Anzahl einzelner Antworten in den Maschinengattungen Forstwirtschaft und Gartenpflege ist niedrig (n = 7 bzw. n = 3), allerdings standen diese Maschinen nicht im Fokus des Studienauftrags.

Abbildung 5: Anzahl (a) teilnehmender Akteure und (b) Antworten pro Maschinengattung.

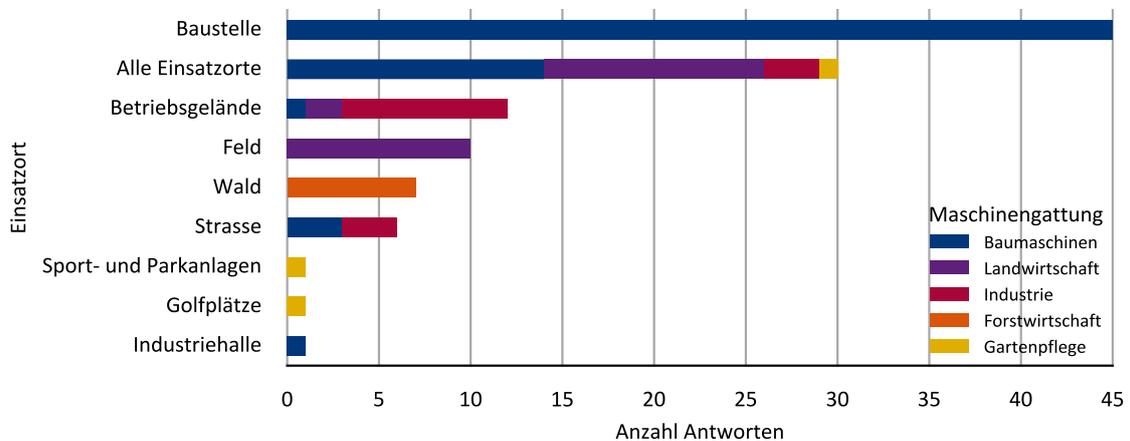


Hinweis: Da einzelne Akteure über mehreren Maschinengattungen Auskunft gegeben haben, ist die Summe aller Akteure in der Abbildung (26) grösser als die Anzahl aller individuellen teilnehmenden Akteure (23).

Grafik INFRAS. Quelle: Befragung AP 1.

- Auch in der Verteilung der Einsatzorte in den Antworten spiegelt sich der Schwerpunkt bei den Baumaschinen wider, wobei die Baustelle als häufigster Einsatzort dieser Maschinen genannt wurde (Abbildung 6). Am zweithäufigsten wurde über alle Maschinengattungen hinweg die Möglichkeit genutzt eine Antwort für «alle Einsatzorte» der Maschinen zu geben, wodurch sich die Auskunft verallgemeinert. Antworten zu spezifischeren Einsatzorte wie Betriebsgelände, Feld und Wald werden von je einer Maschinengattung dominiert (je Industrie, Land- und Forstwirtschaft).

Abbildung 6: Anzahl Antworten pro Einsatzort und Maschinengattung.



Grafik INFRAS. Quelle: Befragung AP 1.

Die Auswertung des Rücklaufs zu einzelnen Maschinenkategorien zeigt, dass besonders viele Antworten zu Baggern, (Hof-)ladern, Traktoren sowie Kehr- und Reinigungsmaschinen über mehrere Leistungsklassen gegeben wurden (Abbildung 30 im Anhang). Damit sind die zahlenmässig wichtigsten Maschinenkategorien der Baumaschinen, Industrie und Landwirtschaft gut durch Auskünfte abgedeckt.

Verglichen mit der Liste aller zur Verfügung stehenden Maschinenkategorien aus dem Non-Road-Emissionsinventar (BAFU 2015) verbleiben dennoch Lücken, wobei die Abdeckung gemessen an der Anzahl Maschinenkategorien in der Gartenpflege am niedrigsten (25% - diese Gattung steht aber nicht im Fokus der Untersuchung) und in der Landwirtschaft am höchsten (80%) ist. Gesamthaft sind viele einzelne Maschinenkategorien zudem nur mit der Auskunft eines einzelnen Akteurs, bzw. mit einer Antwort, abgedeckt. Dank des Aufbaus des Fragekataloges, welcher Auskünfte auf verschiedenen Detaillierungsebenen zulies, konnten Informationen zu diesen Maschinenkategorien aber aus den generelleren Antworten (z.B. zu «allen Baumaschinen») sowie den mündlichen Aussagen der Interviewpartner gewonnen werden.

2.1.2. Internetrecherche

Die Ergebnisse der Befragung wurden mit einer Internetrecherche zum Marktangebot für Non-Road Maschinen mit alternativen Antrieben ergänzt. Zum einen recherchierten wir auf den Internetseiten grosser Hersteller für Bau-, Industrie- und Landwirtschaftsmaschinen nach Serienmodellen, die bereits verfügbar sind oder deren Serienproduktion für die nächsten Jahre angekündigt wurde. Die technischen Spezifikationen der Modelle und ihre Preise wurden, so weit wie öffentlich verfügbar, in einer Sammlung erfasst. Für weitere Preisauskünfte wurde auch auf Portalen für Gebrauchtfahrzeuge recherchiert. Zum anderen suchten wir nach Pilotprojekten, in denen zum Beispiel einmalig ein konventionell angetriebenes Modell elektrifiziert wurde oder die erste Version einer elektrischen Maschine vorgestellt wurde. Erfahrungsberichte aus diesen Pilotprojekten veranschaulichen die aktuellen technischen Möglichkeiten und Herausforderungen bei der Elektrifizierung. Die Sammlung soll einen ersten Überblick verschaffen, erhebt allerdings keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

2.2. AP 2 Mengengerüst heute

In AP 2 wird der aktuelle Bestand an Non-Road-Maschinen im Kanton Zürich geschätzt. Wichtigste Datengrundlage für die Erhebung sind das Mengengerüst des gesamtschweizerischen Emissionsinventars (BAFU 2015) und ergänzend die Fahrzeugregistrierungen aus dem Informationssystem Verkehrszulassung (IVZ). Analog zur Einteilung in AP 1 werden die Maschinenkategorien der Gattungen Baumaschinen, Industrie, Land- und Forstwirtschaft sowie Gartenpflege/Hobby aus dem Emissionsinventar berücksichtigt. Der Gesamtbestand je Maschinenkategorie wird weiter in Leistungsklassen und Antriebstechnologien aufgeschlüsselt. Basierend auf dem Bestand und Betriebsdaten aus dem Emissionsinventar (BAFU 2015) wird auch der jährliche Endenergieverbrauch bestimmt.

Anmerkung: Die Aktualisierung des Mengengerüsts für dieses Projekt erfolgt nicht in derselben Detailtiefe wie die allgemeine Erhebung des gesamtschweizerischen Emissionsinventars.

2.2.1. Gesamtschweizerisches Emissionsinventar als Datengrundlage

Für Maschinenkategorien, von denen nur ein geringer Anteil der Maschinen im IVZ registriert ist, wird das Mengengerüst auf Basis des Emissionsinventars erstellt (BAFU, 2015).

Um die gesamtschweizerischen Bestände dieser Maschinenkategorien für das Jahr 2023 zu ermitteln, werden die Daten der Jahre 2020 und 2025 aus dem Emissionsinventar linear interpoliert. Anschliessend werden die Gesamtbestände anhand geeigneter Indikatoren (bzw. Bevölkerungsanteil für Baumaschinen, oder Anteil landwirtschaftlicher Nutzfläche für Landmaschinen) auf den Anteil des Kantons Zürich skaliert (Tabelle 1).

2.2.2. IVZ als Datengrundlage

Für Maschinenkategorien, von denen ein bestimmter Anteil der Maschinen im IVZ registriert ist¹, werden die Fahrzeugregistrierungen im IVZ zur Schätzung der Bestände genutzt. Berücksichtigt werden alle Maschinen, die zum Zeitpunkt der Datenerhebung (September 2023) im Kanton Zürich immatrikuliert waren und für die eine Leistungsangabe verfügbar ist. Insbesondere für einige Maschinenkategorien mit hohem Anteil am gesamten Energieumsatz wie landwirtschaftliche Traktoren oder Lader (Pneu & Raupen) ist diese Datenquelle relevant.

Voraussetzung für die Nutzung des IVZ als Datenbasis ist die eindeutige Zuordnung der Maschinenkategorie zu einer oder mehreren Karosserieformen, nach denen die Maschinen immatrikuliert sind. Die Zuordnung wird aus dem Emissionsinventar übernommen (Anhang A2, BAFU 2015); einzelne Ergänzungen sind in Tabelle 13 im Anhang aufgeführt. Eine zweite

¹Maschinenkategorien, deren Bestand basierend auf den IVZ-Registrierungen ermittelt wurde: Strassenfertiger, Walzen aller Art, Grader, Lader (Pneu & Raupen) aller Art, Dumper/Kipper, Hubarbeitsbühnen, Bagger (Baumaschinen) / Traktoren Ind, Pistenfahrzeuge (Industrie) / Traktoren LW, Feldhäcksler (Landwirtschaft)

Voraussetzung ist die Annahme, dass mindestens zwei Drittel des Gesamtbestandes der Maschinenkategorie im IVZ registriert sind. Damit wird sichergestellt, dass die Leistungsklassenverteilung der Fahrzeuge im IVZ für den Gesamtbestand dieser Maschinenkategorie hinreichend repräsentativ ist. Um den restlichen, nicht registrierten Bestand zu berücksichtigen, werden Korrekturfaktoren aus dem Emissionsinventar übernommen (BAFU, 2015).

Tabelle 1: Indikatoren zur Skalierung des Anteils der Non-Road-Maschinen im Kanton ZH am gesamtschweizerischen Bestand.

Maschinengattung	Indikator	Anteil Maschinen im Kanton ZH am nationalen Bestand
Baumaschinen	Anteil Bevölkerung ZH an Gesamtbevölkerung CH	0.18
Industrie ausgenommen:	Anteil Arbeitsplätze im 2. Sektor ZH an Gesamtanzahl CH	0.18
▪ Kehr- & Reinigungsmaschinen		
▪ Maschinen Flughafenvorfeld		
▪ Kehr- & Reinigungsmaschinen	Anteil Bevölkerung ZH an Gesamtbevölkerung CH	0.18
▪ Maschinen Flughafenvorfeld	Anteil Passagiere am Flughafen Zürich an Gesamtzahl Passagiere an den Flughäfen Genf und Zürich (Stand 2023; BFS 2024)	0.64
Landwirtschaft	Anteil der landwirtschaftlichen Nutzfläche ZH an gesamter Nutzfläche CH	0.05
Forstwirtschaft	Anteil der Waldfläche ZH an gesamter Waldfläche CH	0.04
Gartenpflege/Hobby	Anteil der Gartenfläche ZH an gesamter Gartenfläche CH	0.12

2.3. AP 3 Substitutions- und Reduktionspotenzial bis 2030

Ziel von AP 3 ist die Abschätzung

- des **Substitutionspotenzials**, also der möglichen Anteile elektrisch oder mit alternativen Antrieben betriebener Non-Road-Maschinen im Kanton Zürich bis zum Jahr 2030
- sowie des **Reduktionspotenzials** einer solchen Entwicklung hinsichtlich Endenergieverbrauch sowie CO₂- und Luftschadstoffemissionen aus dem Maschinenbetrieb.

Als Basis für das **Substitutionspotenzial** dienen die Ergebnisse von AP 1 und AP 2, sowie das Schweizer Non-Road-Emissionsinventar (BAFU 2015):

- Das in AP 2 hergeleitete Mengengerüst des Non-Road-Maschinenparks im Kanton Zürich im Jahr 2023 dient als Ausgangspunkt für eine Modellierung der Flotte bis 2030, basierend auf

Neuzugängen von Maschinen unterschiedlicher Antriebstechnologien sowie Abgängen älterer Maschinen (Ausserverkehrsetzung oder Weiterverkauf ausserhalb des Kantons Zürich).

- Die Technologie-Anteile der neuen Maschinen (Neuzugänge) basieren auf der Marktanalyse in AP 1 – konkret den aktuellen Marktanteilen für 2023, sowie den Schätzungen der Marktanteile 2030 basierend auf Fragebogen, Interviews und Web-Recherche, wobei letztere mit Experteneinschätzungen von INFRAS sowie aus der Literatur (z.B. ERM 2023) ergänzt wurden. Für die Zuordnung der Technologie-Anteile wurden die Maschinenkategorien und Grössenklassen des Mengengerüsts (welche denjenigen des Schweizer Non-Road-Emissionsinventars entsprechen) zu grösseren Gruppen zusammengefasst, innerhalb derer ähnliche Elektrifizierungspotenziale unterstellt werden können (s. Tabelle 2).
- Die Überlebenswahrscheinlichkeiten, d.h. die Wahrscheinlichkeit, dass eine Maschine eines bestimmten Typs mit Alter X aus dem Verkehr gezogen wird, wurden aus den Altersverteilungen pro Maschinentyp gemäss Schweizer Non-Road-Emissionsinventar (BAFU 2015) hergeleitet.

Für die Modellierung der Flotte wird das Flottenmodell der Expertenversion des Handbuchs Emissionsfaktoren für den Strassenverkehr (HBEFA, Notter et al. 2022) verwendet. Dieses wurde primär für Strassenfahrzeuge entwickelt, kann aber auch auf Non-Road-Maschinen angewendet werden. Das Resultat sind die Bestände von Non-Road-Maschinen in jedem Jahr von 2023 bis 2030 nach Antriebstechnologie, Maschinentyp und Grössenklasse. Die aus der Flottenmodellierung resultierenden Gesamtbestände pro Maschinenkategorie bis 2030 werden so skaliert, dass das relative Flottenwachstum demjenigen des Schweizer Non-Road-Emissionsinventars im gleichen Zeitraum entspricht (welches wiederum auf Basis von Indikatoren wie BIP-Prognosen oder Entwicklungstrends wie z.B. der landwirtschaftlichen Nutzflächen prognostiziert wurde).

Hinsichtlich Technologie-Anteilen werden **drei Szenarien** der Flottenentwicklung modelliert:

- Im **«Baseline»-Szenario** werden die Technologie-Anteile konstant gehalten, d.h. die Technologie-Anteile der Neuzulassungen entsprechen denjenigen des Maschinenparks im Jahr 2023;
- **Szenario «Tief»** entspricht der voraussichtlichen kommerziellen Verfügbarkeit neuer Technologien ohne Fördermassnahmen. Es stellt daher hinsichtlich elektrischer Maschinenanteile ungefähr die untere Begrenzung der Bandbreite plausibler Entwicklungen dar;
- In **Szenario «Hoch»** wird eine hohe plausible Adoptionsrate neuer Antriebstechnologien mit Fördermassnahmen und hoher Akzeptanz unterstellt. Es stellt daher hinsichtlich elektrischer Maschinenanteile ungefähr den oberen Rand der Bandbreite plausibler Entwicklungen dar.

Für die Jahre 2024-2029 werden die Neuzulassungsanteile linear zwischen den Werten von 2023 und 2030 interpoliert.

Tabelle 2: In den Szenarien «Tief» und «Hoch» angenommene Technologie-Anteile neuer Non-Road-Maschinen im Jahr 2030.

Kategoriengruppe	Größenklasse	Konventionell	Elektrisch	Hybrid	Wasserstoff
Szenario "tief"					
Mobile Baumaschinen	<= 37 kW	50%	25%	25%	0%
Mobile Baumaschinen	37 – 75 kW	70%	5%	25%	0%
Mobile Baumaschinen	> 75 kW	75%	0%	25%	0%
Stationär eingesetzte Maschinen	Alle	80%	20%	0%	0%
Kommunalmaschinen	<= 37 kW	25%	75%	0%	0%
Kommunalmaschinen	37 – 75 kW	25%	75%	0%	0%
Kommunalmaschinen	> 75 kW	90%	10%	0%	0%
Gabelstapler	Alle	20%	80%	0%	0%
Flughafenvorfeld	Alle	50%	50%	0%	0%
Mobile Maschinen LW+FW	<= 37 kW	90%	5%	5%	0%
Mobile Maschinen LW+FW	37 – 56 kW	100%	0%	0%	0%
Mobile Maschinen LW+FW	> 56 kW	100%	0%	0%	0%
LW hofnahe Maschinen	<= 37 kW	90%	10%	0%	0%
LW hofnahe Maschinen	37 – 75 kW	95%	5%	0%	0%
LW hofnahe Maschinen	> 75 kW	100%	0%	0%	0%
Szenario "hoch"					
Mobile Baumaschinen	<= 37 kW	0%	75%	25%	0%
Mobile Baumaschinen	37 – 75 kW	10%	50%	40%	0%
Mobile Baumaschinen	> 75 kW	30%	25%	40%	5%
Stationär eingesetzte Maschinen	Alle	0%	100%	0%	0%
Kommunalmaschinen	<= 37 kW	0%	100%	0%	0%
Kommunalmaschinen	37 – 75 kW	20%	80%	0%	0%
Kommunalmaschinen	> 75 kW	75%	25%	0%	0%
Gabelstapler	Alle	0%	90%	0%	10%
Flughafenvorfeld	Alle	0%	100%	0%	0%
Mobile Maschinen LW+FW	<= 37 kW	55%	25%	20%	0%
Mobile Maschinen LW+FW	37 – 56 kW	60%	10%	30%	0%
Mobile Maschinen LW+FW	> 56 kW	75%	10%	10%	5%
LW hofnahe Maschinen	<= 37 kW	50%	50%	0%	0%
LW hofnahe Maschinen	37 – 75 kW	50%	50%	0%	0%
LW hofnahe Maschinen	> 75 kW	75%	25%	0%	0%

Für die Abschätzung des **Reduktionspotentials** im Maschinenbetrieb werden schliesslich Endenergieverbrauch und Emissionen in den drei Szenarien berechnet und verglichen:

- Energieverbrauch und Emissionen werden durch Ausmultiplikation der Bestände, Nennleistungen, Lastfaktoren sowie Verbrauchs- bzw. Emissionsfaktoren berechnet. Für Details siehe BAFU (2015) – zu beachten ist, dass die nach Maschinenkategorie, Antriebstechnologie,

Grössenklasse und Jahr aus der Non-Road-Datenbank abgefragten Verbrauchs- und Emissionsfaktoren Einflüsse wie den zunehmenden Anteil von Maschinen neuer Emissionsstandards oder Maschinenverschleiss bereits beinhalten.

- Betriebsstunden pro Jahr und Maschine, durchschnittliche Nennleistungen und Lastfaktoren sowie Verbrauchs- und Emissionsfaktoren konventioneller Antriebstechnologien werden dem schweizerischen Emissionsinventar, konkret der Non-Road-Datenbank des BAFU (INFRAS 2015) entnommen. Von den Luftschadstoffen werden Stickoxide (NO_x) und Feinstaub (PM₁₀) aus dem Abgas betrachtet.
 - Bei konventionellen sowie mit neuen Technologien angetriebenen Maschinen wird der gleiche Energiebedarf in kWh für die gleiche Arbeit angenommen.
 - Für die Verbrauchs- und Emissionsfaktoren der neuen Antriebstechnologien gelten folgende Annahmen (s. auch Tabelle 3):
 - **Hybride Maschinen:** Es wird angenommen, dass es sich dabei hauptsächlich um NOVC-HEV (also nicht extern ladbare, oder Plug-in-hybride) Maschinen handelt – der Elektromotor dient also hauptsächlich zur Verwertung der rekuperierten Energie und zur Unterstützung des Verbrennungsmotors. Entsprechend wird eine Energie-, Treibstoff und CO₂-Einsparung von ungefähr 25% unterstellt. Die NO_x- und PM-Emissionen solcher Motoren liegen typischerweise in derselben Grössenordnung wie diejenigen der entsprechenden konventionellen Maschinen.
 - **Batterie- und kabelelektrische Maschinen:** Hier wird ein Gesamtwirkungsgrad von 77.4% unterstellt, welcher sich aus 90% Wirkungsgrad des Elektromotors und ungefähr 14% Ladeverlusten (gleiche Annahmen wie HBEFA 4.2, Notter et al. 2022) zusammensetzt. Es fallen keine CO₂- oder Luftschadstoffemissionen im Maschinenbetrieb an.
 - **Wasserstoffbetriebene Maschinen:** Da diese bis 2030 nur sehr geringe Bestandesanteile (wenn überhaupt) ausmachen, werden Brennstoffzellen und Wasserstoff-Verbrennungsmotoren hier vereinfachend zusammengefasst. Die Wirkungsgrade beider Technologien liegen grob betrachtet um 50%: Der Wirkungsgrad einer Brennstoffzelle liegt bei rund 60%, was zu kombinieren ist mit dem Wirkungsgrad des dadurch angetriebenen Elektromotors von ungefähr 90% und den Ladeverlusten der dazwischenliegenden Pufferbatterie, womit man bei ungefähr 50% landet. Der Wirkungsgrad von Wasserstoff-Verbrennungsmotoren wird zwar aktuell meist niedriger angegeben; die im aktuellen Projekt befragten Experten rechnen jedoch damit, dass optimierte Wasserstoffmotoren in Hochlast in Zukunft ebenfalls Wirkungsgrade von 50% erreichen können. Diese Annahme mag optimistisch sein, fällt aber aufgrund der sehr geringen voraussichtlichen Bestandesanteile wasserstoffbetriebener Maschinen bis 2030 kaum ins Gewicht.
- Auch bezüglich Luftschadstoffemissionen ist die Annahme von Null Emissionen der

wasserstoffbetriebenen Maschinen nicht ganz korrekt: Sie trifft zwar für Brennstoffzellen im Betrieb zu - Wasserstoff-Verbrennungsmaschinen stoßen aber durchaus Stickoxide (NOx) aus, während CO₂-Emissionen tatsächlich vollständig und Feinstaub-Emissionen wohl sozusagen vollständig vermieden werden können. Wiederum rechtfertigen aber die geringen Bestandesanteile solcher Maschinen bis 2030 diese Vereinfachungen.

Tabelle 3: Annahmen zu Energieverbrauch und Emissionen neuer Antriebstechnologien.

Antriebstechnologie	Energieverbrauch	CO ₂ -Emissionen	NOx-/PM-Emissionen
Hybrid	75% der konventionellen Maschinen		100% der konventionellen Maschinen
Batterie- oder kabel-elektrisch	Wirkungsgrad 77.4%	Keine	Keine
Wasserstoff	Wirkungsgrad 50%*	Keine	Keine*

* Vereinfachende Annahmen sowohl für Brennstoffzellen als auch Wasserstoff-Verbrennungsmotoren angesichts sehr geringer voraussichtlicher Bestandesanteile bis 2030

Zu beachten ist, dass im aktuellen AP nur das Reduktionspotenzial durch neue Antriebstechnologien im Betrieb der Maschinen quantifiziert wird:

- Der Energieverbrauch und die Emissionen aus der Energiebereitstellung oder aus der Herstellung oder Recycling/Entsorgung der Maschinen werden hier nicht betrachtet. Derartige Effekte (z.B. Emissionen bei der Batterieherstellung) können u.U. einen Teil der Einsparungen im Maschinenbetrieb kompensieren. Es ist dazu allerdings zu beachten, dass die Datenbasis diesen Bereichen i.A. weniger robust ist als zur Betriebsphase, v.a. was zukünftige Entwicklungen in der Maschinen-, Batterie- und Energieträgerherstellung angeht.
- Kurzfristig, d.h. im Zeitraum bis 2030, könnte theoretisch eine hohe CO₂-Emissionsreduktion durch den Ersatz von Diesel mit low-carbon-Varianten (z.B. HVO oder «hydrogenated vegetable oil», einem aus erneuerbaren Abfall-Ölen hergestellten synthetischen Diesel) erzielt werden, da dieser Treibstoff in herkömmlichen Maschinen verwendet werden kann (s. auch ERM 2023). Diese Option steht hier einerseits aus inhaltlichen Gründen nicht im Vordergrund – siehe dazu den Abschnitt zur Unterstützung von Bio- oder synthetischen Treibstoffen in Kapitel 0. Andererseits brächte eine Quantifizierung im vorliegenden AP wenig Erkenntnisgewinn, da die relative CO₂-Einsparung 1:1 dem Anteil des substituierten Diesels entspricht – und welcher Anteil dies sein könnte, hängt schlussendlich v.a. vom Einsatz solcher Treibstoffe in anderen Sektoren ab.

2.4. AP 4 Entwicklung Fördermassnahmen zur Dekarbonisierung

AP 4 umfasst die Entwicklung möglicher Massnahmen und Anreize zur Förderung der Dekarbonisierung des Non-Road-Maschinenbestandes im Kanton Zürich. Dazu erstellte INFRAS zuerst eine Sammlung möglicher Fördermassnahmen. Diese Vorschläge wurden anschliessend von einer Begleitgruppe aus Akteure des Non-Road-Maschinen-Sektors ergänzt und hinsichtlich ihrer Wirkung und Umsetzbarkeit bewertet.

Die **Sammlung potenzieller Fördermassnahmen** basiert auf den Rückmeldungen aus der Umfrage in AP 1 und einer Literatur-/Webrecherche zu bestehenden oder geplanten Fördermassnahmen anderer Verwaltungen (Städte/Kantone, national/international). Ergänzt wurde die Sammlung durch den Input weiterer Expert:innen von INFRAS aus den Bereichen Verkehr und Umwelt. Die Massnahmen wurden klassifiziert nach:

- **Handlungsfeld** bzw. Art der Massnahme: Finanzierung, Regulierung oder Projekt- bzw. Wissensunterstützung. Massnahmen, welche der Kanton Zürich für die eigene Verwaltung beschliessen kann, wurden dem Handlungsfeld «Vorbild Kanton» zugeordnet.
- **Nutzungsphasen** der Maschinen: Anschaffung, Energieversorgung und Betrieb/Einsatz

In einem zweiten Schritt wurden die die gesammelten Fördermassnahmen in einem **Workshop mit Stakeholdern** aus Vertretern der kantonalen/kommunalen Verwaltung und der Privatwirtschaft diskutiert. Der Workshop fand am 22. Mai 2024 statt; die Teilnehmenden sind in Tabelle 4 aufgelistet. Ziele des Workshops waren:

- die **Vervollständigung der Sammlung** der Fördermassnahmen und Anreize
- sowie eine **Bewertung** aller Massnahmen **hinsichtlich ihrer Wirkung und Umsetzbarkeit**.

Wirkung und Umsetzbarkeit werden nach den folgenden Kriterien bewertet:

- **Wirkung** bedeutet die Klimaschutzwirkung der Massnahme, konkret die Reduktion von CO₂-Emissionen und Energieverbrauch. Je höher diese ausfällt, desto höher wird die Wirkung eingestuft. D.h. je mehr Maschinen, oder Maschinen mit höherem Energieverbrauch eine Massnahme betrifft, desto höher ist die Wirkung. Auch Massnahmen mit Multiplikator-Effekt (welche zusätzlich zur Investition des Kantons weitere Investitionen von Privatunternehmen oder -personen nach sich ziehen) werden in der Wirkung tendenziell höher eingestuft als solche, die nur direkt wirken.
- **Umsetzbarkeit** bedeutet die Summe der technischen, ökonomischen als auch politischen Umsetzbarkeit. Technische Umsetzbarkeit erfordert die Verfügbarkeit der entsprechenden Technologie; ökonomische Umsetzbarkeit erfordert die nötigen Ressourcen (Geld oder Humankapital); und politische Umsetzbarkeit erfordert Akzeptanz und die Wahrscheinlichkeit

entsprechender politischer Entscheidungen. Letzteres beinhaltet in der vorliegenden Studie aus Sicht des Kantons Zürich auch dessen Zuständigkeit – wo der Kanton nur empfehlen oder anregen kann, ist die Umsetzbarkeit geringer als in Bereichen, in denen er gesetzlich zuständig ist.

Nach diesen Gesichtspunkten wurden die Ergebnisse des Workshops von INFRAS im Nachgang ausgewertet, eingeordnet und eine konsolidierte Übersicht zu den möglichen Fördermassnahmen und Anreizen erstellt. Die Bewertung einiger Massnahmen aus dem Workshop wurde unter Anwendung der obengenannten Kriterien von Wirkung und Umsetzbarkeit, unter Berücksichtigung der von den Teilnehmenden genannten Begründungen, sowie basierend auf der Erfahrung von INFRAS mit vergleichbaren Massnahmen und Projekten im Bereich E-Mobilität angepasst. So wird beispielsweise die Wirkung der Förderung von Ladestationen und -infrastruktur höher eingestuft als am Workshop, weil sie potenziell alle Anwender von Non-Road-Maschinen erreicht und somit eine höhere Reduktionswirkung entfalten kann als eine Massnahme, die nur bei öffentlichen Ausschreibungen zur Anwendung kommt. Als anderes Beispiel wurden die die kantonale Fahrzeugflotte betreffenden Massnahmen in der Wirkung etwas niedriger als am Workshop eingestuft, weil die kantonale Flotte nur einen kleinen Teil des gesamten Maschinenparks ausmacht.

Tabelle 4: Teilnehmende des Workshops am 22. Mai 2024 zur Entwicklung der Fördermassnahmen.

Name	Arbeitsort	Expertise im Non-Road-Sektor
Marco Landis	Strickhof (Baudirektion Kanton Zürich)	Landwirtschaftliche Maschinen
Raphael Bernet		
Igor Grcic	Bucher Municipal	Hersteller Kommunalmaschinen
Marcel Bräm	Stadt Zürich	Fahrzeugbeschaffung
Jeannot Wagner	Tiefbauamt Kanton Zürich	Fahrzeugbeschaffung
Therese Fankhauser	Stadt Zürich	Baumaschinen
Marco Meier	Ecoforce	
Cuno Bieler		
Thomas Stoiber	Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL) Kanton Zürich	Umweltbehörde
Urs Eggenberger		
Beat Gloor		
Thomas Stoiber		

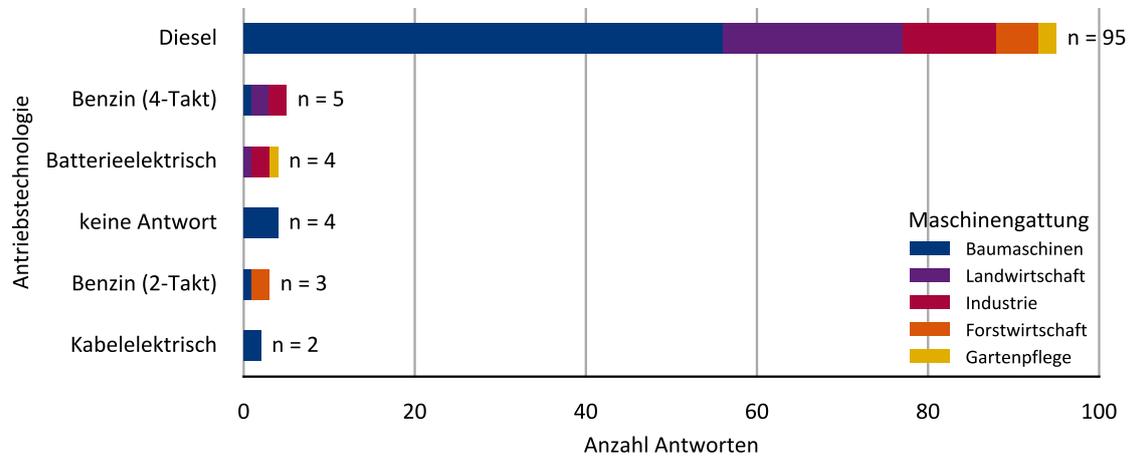
3. Resultate

3.1. AP 1 Marktanalyse

3.1.1. Häufigkeit der Antriebstechnologien heute

Die überwiegende Mehrheit der Non-Road-Maschinen aller Gattungen wird heute noch mit konventionellen Antriebstechnologien betrieben. Als wichtigste Antriebstechnologie zählen Dieselmotoren, welche bei den meisten grösseren Non-Road-Maschinen zum Einsatz kommen; darauf folgen die Benzinmotoren, welche v.a. für kleinere Geräte verwendet werden (Abbildung 7). Alternative (teil-)elektrische Antriebstechnologien werden heute noch nicht breit eingesetzt, sondern kommen eher für spezifische Arbeiten zur Anwendung. Sofern verfügbar, sind batterie- oder kabelbetriebene Antriebstechnologien gemäss unserer Befragungsergebnisse dabei die am häufigsten eingesetzten (teil-)elektrischen Alternativen (Abbildung 8). Maschinen mit Brennstoffzellen oder hybride Antriebslösungen wurden von den teilnehmenden Akteuren kaum erwähnt.

Abbildung 7: Anzahl Antworten pro Antriebstechnologie, die am häufigsten für Non-Road-Maschinen eingesetzt wird, Stand heute.

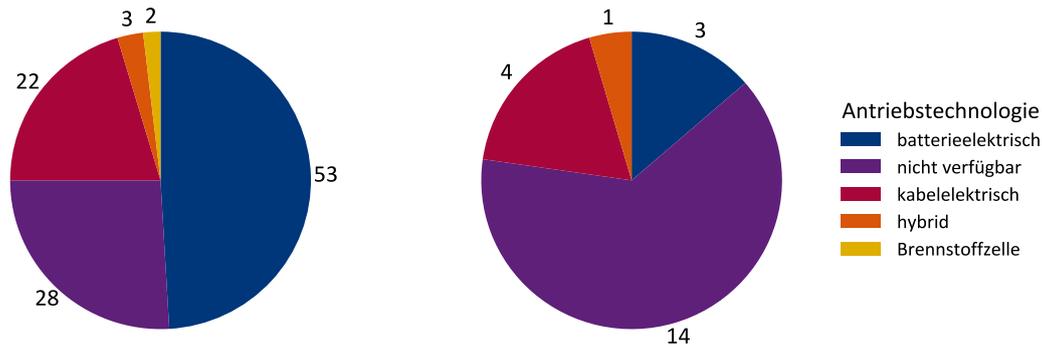


Grafik INFRAS. Quelle: Befragung AP 1.

Abbildung 8: Antworten zur Häufigkeit alternativer Antriebstechnologien für Non-Road-Maschinen, Stand heute. «Nicht verfügbar» wurde als Antwort ausgewählt, wenn marktseitig zum Zeitpunkt der Umfrage kein Angebot mit alternativen Antrieben bestand.

(a) häufigste Alternative (n = 108)

(b) zweithäufigste Alternative (n = 22)



Hinweis: n ist die Gesamtanzahl erhaltener Antworten zu dieser Frage.

Grafik INFRAS. Quelle: Befragung AP 1.

Heutiges Angebot alternativ angetriebener Non-Road-Maschinen

Alternative Antriebstechnologien, insbesondere mit Batterien, sind heute vor allem bei Maschinen in Innenräumen verbreitet, wie z.B. bei Gabelstaplern in der Industrie oder Futtermischwagen in der Landwirtschaft. Auch stationäre Baumaschinen, die mit einem Kabel betrieben werden können, z.B. Bohrgeräte (z.B. von Liebherr) und Sortierbagger (Bauschuttsortierer), kommen bereits zum Einsatz. In der Gartenpflege wird das Angebot für Maschinen mit geringer Leistung bis 5 kW (Motorsägen, Freischneidegeräte, Rasenmäher, z.B. von Stihl) bereits seit einigen Jahren durch elektrische Versionen ausgebaut. Ein weiteres etabliertes Anwendungsgebiet für elektrische Non-Road-Maschinen sind Kehr- und Reinigungsmaschinen (z.B. von Bucher Municipal), welche v.a. von Gemeinden/Städten eingesetzt werden. Diese Angaben zu Maschinenkategorien stammen hauptsächlich aus Angaben in der Befragung sowie den Anschlussinterviews. Schätzungen für heutige Marktanteile der elektrischen Maschinen wurden nur selten abgegeben, die meisten Werte liegen dabei unter 10 % (s. auch Abbildung 37 im Anhang).

Aus der Internetrecherche (s. Tabelle 12 im Anhang) lässt sich ergänzen, dass zunehmend auch elektrische Transporter, Ladewagen und Dumper mit einer Leistung bis 18 kW auf dem Markt verfügbar sind (z.B. von Bucher Municipal, Elion, Meili, Tropos). Je nach Aufbau (Ladepritsche, geschlossener Transporter, Abfallwannen, Feuerlöscher, Reinigungsmodul) können sie flexibel zu verschiedenen Zwecken eingesetzt werden (nach dem Non-Road-Emissionsinventar wurden sie der Landwirtschaft zugeordnet). Ebenfalls konnten wir einige Angebote für batterieelektrische Pneu- oder Raupenlader (z.B. von Volvo, Kramer, Wacker Neuson) mit Leistungen

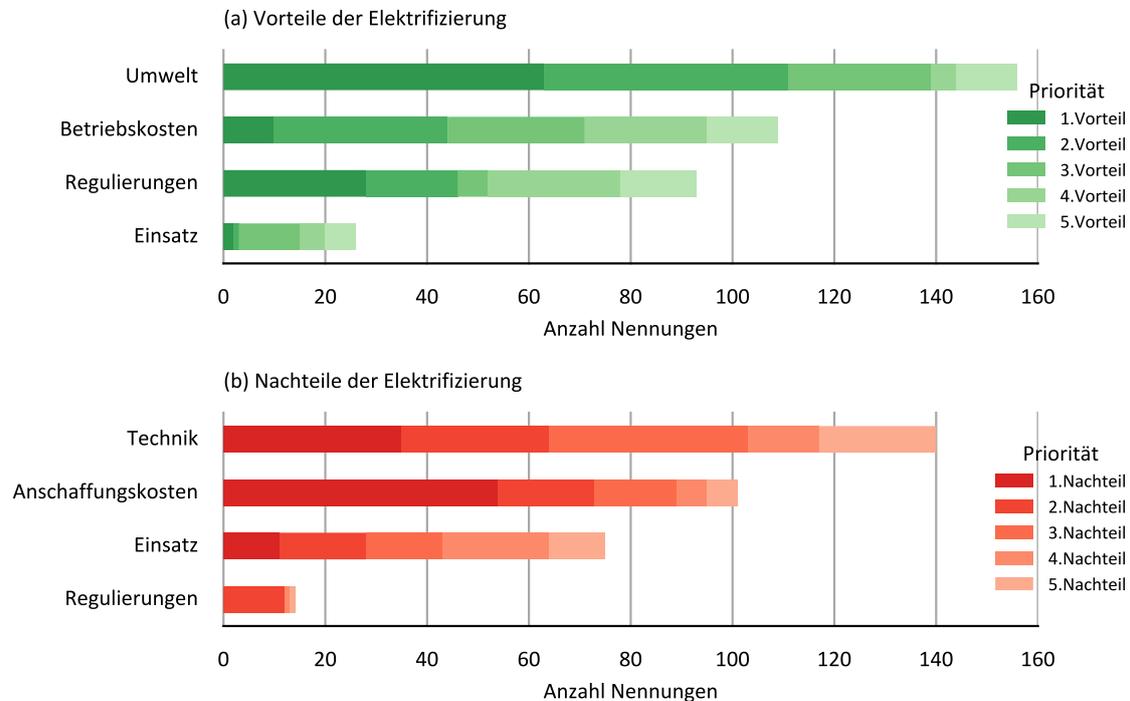
bis 37 kW und für Minibagger mit Leistungen bis 18 kW (z.B. von Volvo, JCB, Wacker Neuson) finden.

Alle diese mobilen Maschinenkategorien haben gemeinsam, dass sie für ihren Betrieb eher eine geringe Leistung benötigen. Für grössere Maschinen aller Gattungen gibt es noch so gut wie kein Angebot auf dem Markt. Insbesondere für die anzahlmässig häufigste (und auch vom Energieverbrauch her wichtigste) einzelne Non-Road-Maschinenkategorie, die landwirtschaftlichen Traktoren, sind bis auf wenige Unikate aus Pilotprojekten (z.B. Sesam2 von John Deere mit einer Leistung von 500 kW) und ein erstes Modell eines einzelnen Hersteller (Rigitrac) keine elektrischen Alternativen verfügbar. Das Modell von Rigitrac fällt in die Leistungsklasse bis 56 kW und kommt daher vor allem für kommunale Arbeiten oder im Gartenbau zum Einsatz. Ein typischer Einsatz im landwirtschaftlichen Betrieb auf dem Feld kann mit dieser Maschine noch nicht geleistet werden. Der Preis dieses Modells ist etwa doppelt so hoch wie der eines konventionell betriebenen Traktors derselben Leistungsklasse. Ankündigungen grosser Hersteller für Traktoren mit grösserer Antriebsleistung sind für die nächsten Jahre zum Teil vorhanden (z.B. der eVario von Fendt), bezüglich Zeitplan und Produktionsvolumen jedoch nicht aussagekräftig.

3.1.2. Vor- und Nachteile der Elektrifizierung

Als wichtigste Vorteile der Elektrifizierung von Non-Road-Maschinen werden von den Befragten die Umweltfreundlichkeit durch den emissionsfreien Betrieb und die Lärmreduktion genannt. Dagegen werden die begrenzte Leistungsfähigkeit und die hohen Investitionskosten der heute verfügbaren elektrischen Antriebe als besonders nachteilig bewertet (s. Abbildung 9).

Abbildung 9: Verteilung der Antworten zu (a) Vorteilen und (b) Nachteilen der Elektrifizierung, kategorisiert in Themenbereiche und mit Angabe der Priorität. Detaillierte Antworten im Anhang.



Für eine übersichtliche Darstellung der Ergebnisse wurden die Antworten in übergeordnete Themenbereiche kategorisiert². Die detaillierten Antworten sind in Abbildung 32 im Anhang einsehbar.

Grafik INFRAS. Quelle: Befragung AP 1.

Vorteile der Elektrifizierung

Die am häufigsten genannten und als am wichtigsten eingestuft Vorteile der Elektrifizierung liegen im Themenbereich «Umwelt»: Elektrische Antriebe haben einen höheren Wirkungsgrad (inkl. Ladeverluste knapp 80%) als mit Diesel oder Benzin betriebene Motoren (mehrheitlich zwischen 20% und 35%), so kann **Energie gespart** werden. Zudem besteht die Möglichkeit, Energie während des Betriebs besser zu rekuperieren (überall dort, wo Gewicht abgesenkt wird, besteht ein hohes Rekuperationspotenzial³), und es bestehen Effizienzpotenziale bei der Digitalisierung der Hydraulik – ein Pilotprojekt von Danfoss konnte so bspw. eine Effizienzsteigerung um 15% erreichen (Budden und Williamson 2019).

² Die Zuordnung der Argumente zu den Themenbereichen ist nicht immer eindeutig – bspw. kann eine Aussage zur «Energieeinsparung» der elektrischen Maschinen sowohl als Umweltvorteil als auch als Kostenvorteil kategorisiert werden. In einem solchen Fall wurde das Energie-Argument OHNE Erwähnung der Kosten dem Themenbereich Umwelt zugeordnet; wurden hingegen Kosten als Vorteil mit erwähnt, wurde die Aussage dem Themenbereich Kosten zugeordnet.

³ Also bspw. bei Baggern, welche ihren Arm, tlw. mit gefüllter Schaufel, ständig heben und senken. Oder in noch höherem Ausmass bei Dumpfern in Steinbrüchen, welche leer nach oben und beladen nach unten fahren (s. Lithium System 2024).

Besonders häufig wurde auch die **Reduktion von Lärmemissionen** beim Betrieb der Maschinen genannt. Dies erhöht den Komfort für die Fahrer:innen und die Flexibilität hinsichtlich der Einsatzzeiten der Maschinen. Zum Beispiel verlängern sich im Kommunalbereich die möglichen Einsatzzeiten von Kehrmaschinen in Wohngebieten. Mit der zweithöchsten Priorität wurde vielfach der Vorteil angegeben, dass durch die Elektrifizierung **lokale Emissionen von Treibhausgasen und Partikeln vermieden** werden.

Die häufig genannten Kostenvorteile durch die Elektrifizierung beziehen sich vor allem auf die **Einsparung von Wartungskosten**. (Teil-)elektrische Antriebe sind erwartungsgemäss robuster als konventionelle Antriebe, da es z.B. weniger bewegliche Bauteile gibt, die mit Zeit verschleissen und zyklisch ersetzt werden müssen. Der zweite Kostenvorteil ergibt sich aus der verbesserten Energieeffizienz, sodass **Energiekosten für den Betrieb geringer** ausfallen. Die Priorität dieser Kostenvorteile ist insgesamt geringer als die der umweltbezogenen Vorteile.

Im Themenbereich der Regulierungen bezogen sich die meisten Antworten auf **Vorschriften zu Schadstoff- und Treibhausgasemissionen**, die mit elektrifizierten Maschinen leichter erfüllt werden.

Im betrieblichen Ablauf werden eher weniger Vorteile durch den Einsatz elektrifizierter Maschinen im Vergleich zu konventionellen Maschinen erwartet. Ein höheres Automatisierungspotenzial durch Selbst- oder Fernsteuerung der Maschine, höhere Präzision in der Arbeit oder eine verbesserte Bedienung wurden von den Befragten nur selten als Vorteil genannt, obwohl dies in der Literatur als wichtiger Aspekt genannt wird (Lajunen et al. 2018).

Nachteile der Elektrifizierung

Die Antworten zu den Nachteilen der Elektrifizierung von Non-Road-Maschinen waren vielfältiger als die zu den Vorteilen. Insbesondere wurden auf allen Prioritätsebenen zahlreiche unterschiedliche technische Nachteile beschrieben, die derzeitige (teil-)elektrische Antriebstechnologien einschränken. Ein zentraler Punkt ist, dass **die verfügbaren Batterien für den regulären Betrieb derzeit in der Regel nicht leistungsfähig genug sind** – weder um die erforderliche Anzahl autonomer Betriebsstunden abzudecken noch um Höchstleistungen abzurufen. Batteriesysteme mit entsprechender Leistung wären nach heutigem Stand der Technik zu gross oder zu schwer, um in die Maschinen eingebaut zu werden.

Neben den vielfältigen technischen Aspekten sind die **höheren Anschaffungskosten** für elektrifizierte Maschinen der wichtigste und am häufigsten genannte Nachteil. Die hohen Kosten werden vor allem durch den **Aufwand für die Batterieherstellung** sowie durch die derzeit **hohen Entwicklungskosten der Hersteller** verursacht.

Wo die elektrische Alternative noch nicht am Markt etabliert ist (anderes als z.B. bei Gabelstaplern oder Kehrmaschinen), ist der Preis je nach Maschinenkategorie zum Stand heute

teilweise mehr als doppelt so hoch wie bei der konventionellen Variante. Zusätzlich zu diesen hohen Anschaffungskosten fallen mitunter auch Kosten an, die benötigte Ladeinfrastruktur am Einsatzort auszubauen.

Beim Einsatz von elektrifizierten Maschinen ist derzeit vor allem die **fehlende Ladeinfrastruktur** ein Nachteil. Zum einen muss ein geeigneter Netzanschluss mit ausreichender Stromversorgung am Einsatzort der Maschine vorhanden sein, zum anderen darf die erforderliche Ladezeit einer batteriebetriebenen Maschine den regulären Betriebsablauf nicht einschränken. Je nach Batteriekapazität ist das Laden nur über Nacht möglich und stösst auch in diesem Fall an Grenzen (s. auch Kapitel 3.1.3). Kabelgebundene Antriebslösungen sind für viele Einsatzorte und den mobilen Einsatz der Maschinen ungeeignet. Um den regulären Einsatz der Maschinen zu gewährleisten, fehlt häufig auch die **Infrastruktur für Wartungsarbeiten**, da Fachpersonal mit der nötigen Expertise noch rar ist und eigenständige Wartungsarbeiten aufgrund von Sicherheitsbedenken im Umgang mit Hochvoltsystemen risikobehaftet wären.

Abbildung Im Themenbereich «Regulierungen» wird erwähnt, dass **elektrische Maschinen nicht durch Subventionen oder steuerliche Entlastungen gefördert werden**. Konventionell betriebene Maschinen hingegen werden z.B. in der Landwirtschaft durch die anteilige Rückerstattung der Mineralölsteuer staatlich finanziell unterstützt. Eine Ausnahme ist ein neues Programm der Stiftung Klimaschutz und CO₂-Kompensation (KliK), die den Einsatz batterieelektrisch betriebener Baufahrzeuge mit einem einmaligen Investitionsbeitrag und einem jährlichen Betriebsbeitrag in Abhängigkeit der erwarteten Emissionsverminderungen finanziell fördert (Stiftung KliK 2023). Typische Investitionsbeiträge liegen im Bereich von 4'000-16'000 CHF und pro reduzierter Tonne CO₂ pro Jahr erhalten teilnehmende Betriebe 200 CHF.

Erfahrungen aus Pilotprojekten

Pilotprojekte, in denen konventionelle Maschinen einmalig in elektrische Versionen umgebaut wurden, liefern erste, individuelle Erfahrungen zu den tatsächlichen Vor- und Nachteilen bei der Umsetzung der Elektrifizierung einer Non-Road-Maschine. Diese repräsentieren zwar nur bedingt den Einsatz eines Serienmodells, i.e. Maschinen, die in grösseren Stückzahlen produziert wurden. Für diese Maschinen sind Erfahrungsberichte aktuell allerdings noch rar.

Als erster Eindruck konnten aus den Interviewaussagen vorwiegend Nachteile zum Einsatz der Unikate entnommen werden. Die elektrischen Versionen der Maschinen seien vermehrt von technischen Ausfällen betroffen und die Leistung der Maschine wird nicht optimal genutzt. Leistungsspitzen können nur schwer gedeckt werden und aktuelle Ladezeiten schränken die Einsatzmöglichkeiten ein. Zudem ist der Aufwand für die Zulassung höher und teurer als für die konventionelle Maschine. Daher sei die individuelle Umsetzung nur zu Forschungszwecken

oder aus Überzeugung für die Unterstützung der Elektrifizierung des privaten Fahrzeugparks attraktiv.

Diese Erfahrungen verdeutlichen die aktuellen Herausforderungen in der Elektrifizierung. Es ist zu erwarten, dass diese – gemäss Aussagen unserer Interviewpartner vergleichbar zu den Entwicklungen im PV-Bereich – durch industrielle Serienfertigungen gelöst oder zumindest entschärft werden können. Dazu ist jedoch weitere Forschung und Entwicklung nötig.

3.1.3. Betriebliche Aspekte

Die Diversität von Non-Road-Maschinen zeigt sich in der Vielfalt ihrer möglichen Betriebsformen. Die betrieblichen Umstände beeinflussen, welche alternativen Antriebstechnologien das grösste Einsatzpotential haben. Die im Folgenden erwähnten Aspekte beziehen sich auf die Umsetzung von (teil-)elektrischen Antriebstechnologien.

Einsatzort

Non-Road-Maschinen unterscheiden nach dem **Grad der Mobilität** ihres Einsatzes:

- Einige Maschinen, wie z.B. Traktoren in der Landwirtschaft, die zur Bewirtschaftung von Feldern eingesetzt werden, müssen während ihres Einsatzes erhebliche Strecken zurücklegen, abseits von Lademöglichkeiten.
- Andere Maschinen, z.B. Kehr- und Reinigungsmaschinen, legen im regulären Betrieb zwar auch grössere Strecken zurück, fahren aber langsam und halten sich – wie im kommunalen Betrieb – näher an Ladestationen auf, was häufigeres Nachladen während des Einsatzes ermöglicht.
- Im (quasi)-stationären Betrieb legen einige Maschinen im Normalfall kaum oder gar keine Distanzen zurück. Abhängig von den örtlichen Begebenheiten ist in solchen Fällen ein kabelgebundener Betrieb möglich, beispielsweise für Umschlagbagger auf einem Schrottplatz. An anderen Einsatzorten wäre ein Kabelbetrieb aus Sicherheitsgründen oder wegen fehlender Stromversorgung jedoch trotzdem nicht praktikabel, so z.B. auf einer Baustelle.
- Im Innenbereich eingesetzte Maschinen wie z.B. Gabelstapler eignen sich besonders für die Elektrifizierung; elektrische Modelle sind bereits seit Jahrzehnten auf dem Markt verfügbar.

Tägliche Betriebsdauer

Die Vielfalt der Betriebsformen spiegelt sich auch in den Befragungsergebnissen zu den **täglichen Betriebsstunden** der Maschinen wider (s. Abbildung 31 im Anhang). Sind die Maschinen eher kürzer pro Tag im Einsatz, ist das Laden tagsüber eventuell nicht nötig oder während einer Pause möglich. Dieser Fall passt zu den Baumaschinen, die gemäss der Antworten häufig nur etwa 3 Stunden pro Tag in Betrieb sind. Längere Einsätze pro Tag, wie sie für bestimmte

landwirtschaftliche Maschinen genannt wurden, erhöhen die Anforderungen an die Umsetzung der Elektrifizierung. Ein Extrembeispiel hierfür sind Mähdrescher, die in der Erntezeit mehr als 12 Stunden täglich mit hoher Leistung betrieben werden. Aber auch Maschinen auf Baustellen müssen hohe tägliche Einsatzzeiten leisten.

Leistung und Motorlast

Neben der Anforderung an die tägliche Betriebsdauer der Maschine ist die **Leistung und der effektiv davon abgerufene Anteil** (d.h. der Lastfaktor) relevant. Leistungsfähigere – d.h. in der Regel grössere – Maschinen verbrauchen mehr Energie in der gleichen Zeit.

Für Maschinen mit dynamischem Lastfaktor, die eine Vielzahl unterschiedlicher Arbeit verrichten, sind zudem die **Leistungsspitzen** relevant: Es muss nicht nur die durchschnittliche Leistung über die erforderliche Dauer von der Batterie erbracht werden, sondern auch die Leistungsspitzen müssen abgedeckt sein. Gerade dieser Punkt wird von vielen Teilnehmenden an der Befragung heute noch bemängelt.

Ein in den Interviews genannter Ansatz zur Abschätzung der Grenze der Elektrifizierbarkeit basierend auf dem Energiebedarf der erbrachten Arbeit (d.h. Betriebsstunden x Leistung x Lastfaktor) schätzt die Limite bei ca. 516 kWh: Erbringt eine Maschine pro Einsatztag eine höhere Arbeitsleistung und kann während des Einsatzes nicht nachgeladen werden, müsste sie länger als 12 Stunden bei 43 kW Anschlussleistung werden – d.h. eine Ladung über Nacht würde nicht ausreichen, um die Batterie vollständig aufzuladen (mündliche Mitteilung K. Weller, TU Graz). Die 516 kWh können entweder mit höherer abgerufener Leistung oder einer längeren täglichen Betriebsdauer erreicht werden: z.B. würde eine Maschine mit einer Leistung von >160 kW und einem durchschnittlichen Lastfaktor von 40% diese Grenze erreichen, wenn sie 8h pro Tag in Betrieb ist. Eine Maschine mit doppelter Leistung und ähnlichem Lastfaktor würde die Grenze schon nach 4 Betriebsstunden erreichen. Die 43 kW Anschlussleistung entsprechen aber nur ungefähr dem Maximum eines Niederspannungsanschlusses für Haushalte; Elektrizitätswerke können für Baustellen auf Anfrage höhere Leistungen zur Verfügung stellen. Ausserdem können auf elektrifizierten Baustellen grosse Pufferbatterien kontinuierlich mit niedriger Leistung geladen werden, und grosse Maschinen können ab diesem Speicher in kurzer Zeit mittels Schnellladung geladen werden – oder die Batterie wechseln («WC-Spülungs-Prinzip»; s. auch ERM 2023).

Batteriegrösse und -Gewicht

Bei grossen Maschinen fällt auch die Grösse und das Gewicht der für die erbrachte Leistung und Dauer erforderliche Batterie an sich ins Gewicht. Teilweise ist nicht genügend Stauraum

für die erforderliche Batteriegrösse verfügbar; und bei Land- oder Forstmaschinen könnte eine zu schwere Batterie überdies zu stark zur Bodenverdichtung beitragen.

Rekuperationspotenzial

Das Potenzial zur Rekuperation von Energie variiert je nach von der Maschine erbrachten Arbeit. Es ist dann besonders hoch, wenn Masse gesenkt wird. Maschinen in speziellen Einsatzgebieten haben teilweise ein sehr hohes Rekuperationspotenzial – z.B. Dumper in Bergwerken, welche leer hoch- und voll herunterfahren. In solchen Fällen können auch sehr grosse Maschinen batterieelektrisch betrieben werden (s. z.B. E-Dumper von eMining Switzerland mit 634 kW Leistung in Tabelle 11).

Einsatzdauer und Ladezeiten heute verfügbarer Maschinen

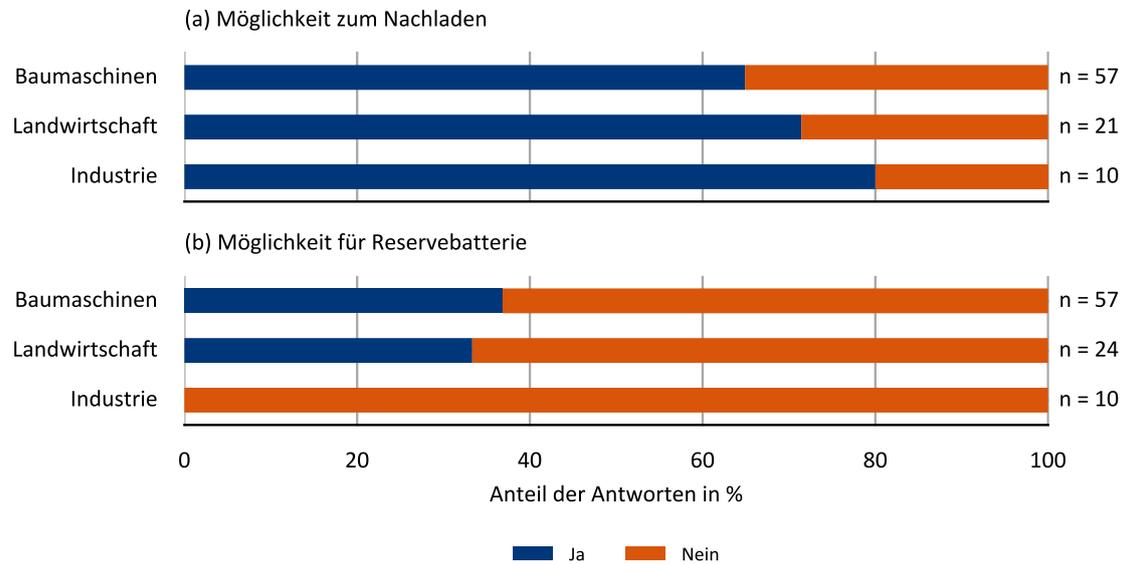
Die Angaben der Hersteller zur **Einsatzdauer** heute verfügbarer batterieelektrischer Maschinen reichen von 2 bis 10 h. Ein ganzer Arbeitstag mit einer Einsatzdauer von 8 h ist vor allem mit Maschinen aus dem Industriebereich bereits heute möglich. Die Batterieleistung der Bau- und Landmaschinen reicht dagegen eher für einen halben Arbeitstag. Bei Landmaschinen, z.B. Transportern mit Wechselaufbau, wird häufig statt der Einsatzdauer die Reichweite angegeben. Diese liegt typischerweise zwischen 100 und 200 km. Bei diesen Werten ist zu beachten, dass es sich um Maximalwerte und nicht im Durchschnitt im Betrieb erreichbare Werte handelt.

Die entsprechenden **Ladezeiten** reichen von 2 bis 15 h (s. auch Abbildung 39 im Anhang). Die Ladezeit ist also meist länger als die damit mögliche Einsatzdauer (wobei aber oft Standard-Ladebedingungen bei 230 V bei 16 A Stromstärke oder On-Board-Ladegeräte mit 22 kW Ladeleistung genannt werden; mit externen Schnellladestationen kann die Ladezeit im Durchschnitt um etwa die Hälfte reduziert werden, hierfür werden z.B. 400 V bei 32 A Stromstärke benötigt).

Option Nachladen

Nach Einschätzung der teilnehmenden Akteure wäre das **Nachladen** im Regelbetrieb für die meisten Maschinenkategorien möglich («Ja»-Anteil von 65-80% in Abbildung 10a). Das Mitführen von Reservebatterien im regulären Betrieb, die nach einem Austausch die autonome Einsatzzeit verlängern könnten, wird hingegen eher ausgeschlossen («Ja»-Anteil 0-37% in Abbildung 10b). Gründe hierfür könnten die Anschaffungskosten oder der Aufwand für den Batteriewechsel sein.

Abbildung 10: Angaben zu Optionen für den regulären Betrieb von elektrifizierte Non-Road-Maschinen verschiedener Maschinengattungen.



Grafik INFRAS. Quelle: Befragung AP 1.

3.1.4. Mögliche Fördermassnahmen

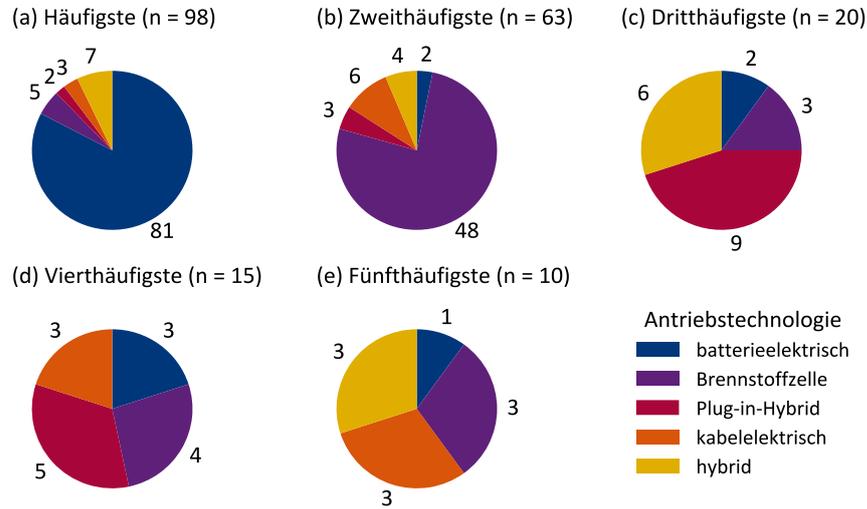
Die Vorschläge der teilnehmenden Akteure für Fördermassnahmen aus der Umfrage von AP 1 wurden in AP 4 aufgenommen (Kapitel 3.4).

3.1.5. Potentialabschätzung Elektrifizierung bis 2030

Erwartete Häufigkeit (teil-)elektrischer Antriebstechnologien bis 2030

Bei der Auswahl verschiedener alternativer Antriebsarten für Non-Road-Maschinen wird sich den teilnehmenden Akteuren zufolge bis 2030 am ehesten der batterieelektrische Antrieb durchsetzen (Abbildung 11). Brennstoffzellen wurden am häufigsten an zweiter Stelle der alternativen Technologien genannt, während hybride oder kabelbetriebene Technologien weiterhin nicht als relevant eingeschätzt werden. Antworten für noch weitere, weniger priorisierte Möglichkeiten (Antworten zu «dritthäufigster» bis «fünfhäufigster» erwarteter alternativer Antrieb, Abbildung 11) wurden nur selten gegeben (s. dazu jedoch Kapitel 3.1.6 zum Potential weiterer alternativer Antriebe).

Abbildung 11: Antworten zur erwarteten Häufigkeit der alternativen Antriebstechnologien für Non-Road-Maschinen im Jahr 2030.



Hinweis: n ist die Gesamtanzahl erhaltener Antworten für diese Prioritätsebene.

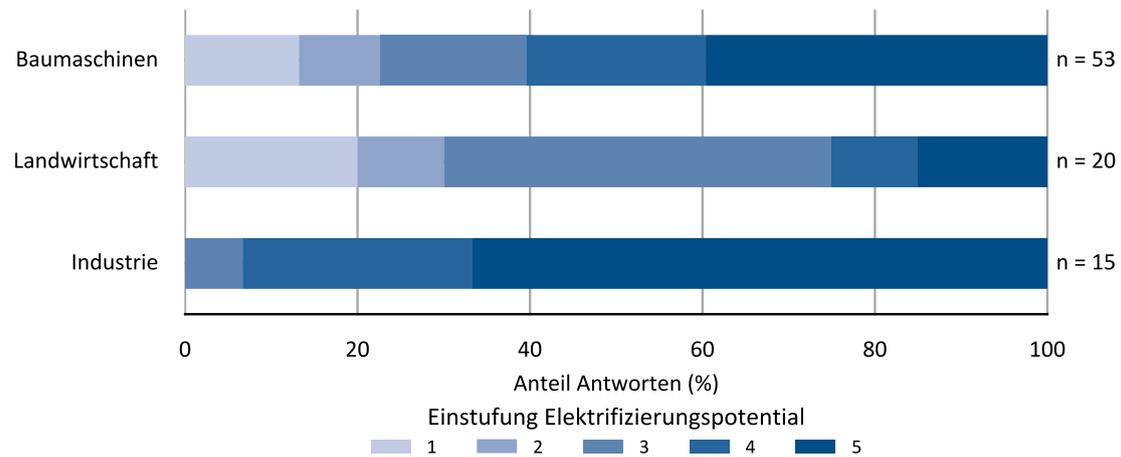
Grafik INFRAS. Quelle: Befragung AP 1.

Einstufung des Elektrifizierungspotential bis 2030

Wie gross das Elektrifizierungspotential bis 2030 der batteriebetriebenen Maschinen eingestuft wird, hängt stark von der jeweiligen Maschinengattung und -kategorie ab.

Innerhalb der Maschinengattungen steigt die durchschnittliche Einstufung des Elektrifizierungspotentials (Skala von 1 bis 5 mit höchstem Potential bei 5, Abbildung 12) von Maschinen der Landwirtschaft (\bar{x} 3, n = 19), zu den Baumaschinen (\bar{x} 3.6, n = 43) hin zu Maschinen aus der Industrie (\bar{x} 4.5, n = 15). Passend dazu zeigen Ergebnisse für die Einstufung der verschiedenen Einsatzorte, dass das Elektrifizierungspotential für Maschinen, die auf dem Betriebsgelände (\bar{x} 4.4, n = 12) eingesetzt werden, also typischerweise Industriemaschinen (Abbildung 6), höher geschätzt wird als für Maschinen, die auf Feld (\bar{x} 3.5, n = 7) oder Baustelle (\bar{x} 3.5, n = 27), eingesetzt werden.

Abbildung 12: Einstufung des Elektrifizierungspotentials bis 2030 für batterieelektrische Non-Road-Maschinen pro Maschinengattung. Skala von 1 bis 5 mit 5 als Höchstwert für das Elektrifizierungspotential.



Hinweis: n ist die Gesamtanzahl erhaltener Antworten für diese Maschinengattung. Die Anzahl Antworten für die Maschinengattungen Forstwirtschaft und Gartenpflege war so gering, dass auf eine detaillierte Auswertung verzichtet wurde.

Grafik INFRAS. Quelle: Befragung AP 1.

Der Anstieg der Einstufung des Elektrifizierungspotentials von Bau- zu Landwirtschaft gilt auch auf Detailebene der einzelnen Maschinenkategorien für die anzahlmässig wichtigsten Maschinen. Tendenziell wird das Elektrifizierungspotential bei Baggern (\emptyset 3, n = 8) und Walzen (\emptyset 3.4, n = 8) höher eingeschätzt als bei Traktoren (\emptyset 2.8, n = 8) und Hofladern (\emptyset 2.6, n = 5). Darüber hinaus ist die Belastbarkeit der Ergebnisse für die einzelnen Maschinenkategorien limitiert, da nur vereinzelt Antworten pro Kategorie vorliegen (Abbildung 33 im Anhang).

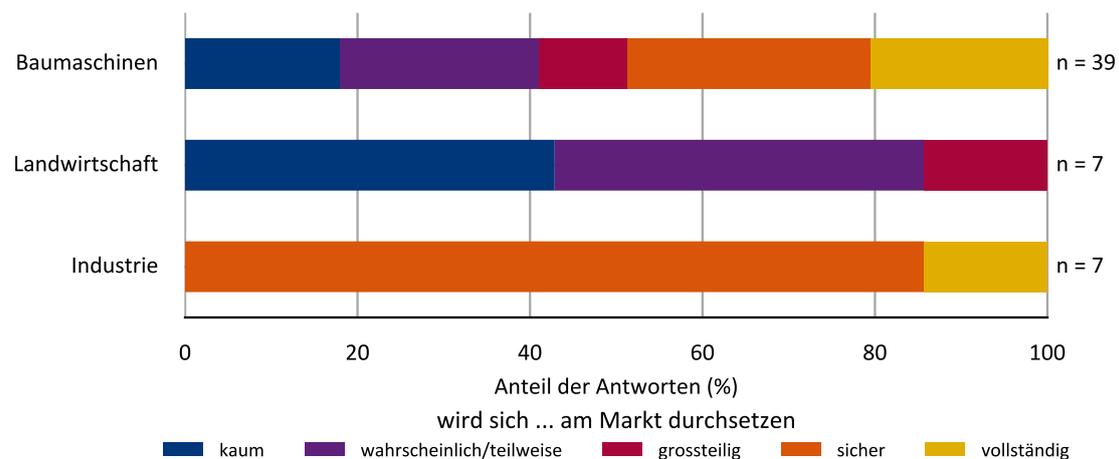
Unabhängig von den einzelnen Maschinenkategorien zeigt sich eine leichte Tendenz der Antworten in Abhängigkeit von der Leistungsklasse, wobei das Potenzial für Leistungen bis 37 kW im Durchschnitt um eine Stufe höher eingeschätzt wird als für höhere Leistungen (Abbildung 34). Günstig für die Elektrifizierung ist auch, wenn die Möglichkeit besteht, die Batterie während des Betriebs der Maschine aufzuladen oder eine Reservebatterie mitzuführen. Sind diese Optionen vorhanden, wird das Potenzial im Durchschnitt ebenfalls um eine Stufe höher eingestuft als ohne diese Option (Abbildung 35 im Anhang).

Schätzung der Marktanteile bis 2030

Ausgehend von der Einstufung des Elektrifizierungspotentials schätzten die Befragungsteilnehmenden für ihre Auswahl die Marktanteile der elektrifizierten Maschinen bis 2030, qualitativ und in Angabe von %. Die Schätzungen reproduzieren erneut die Ergebnisse der Einstufung, d.h. erwartungsgemäss werden sich elektrische Maschinen am stärksten in der Industrie durchsetzen, gefolgt von Baumaschinen und Maschinen der Landwirtschaft. Allerdings sind die

Ergebnisse aufgrund der deutlich geringeren Rücklaufquote mit einer grösseren Unsicherheit behaftet als die qualitative Einstufung (Abbildung 13; Abbildung 36 und Abbildung 37 im Anhang).

Abbildung 13: Qualitative Abschätzung der Marktanteile für batterieelektrische Non-Road-Maschinen pro Maschinengattung.



Hinweis: n ist die Gesamtanzahl erhaltener Antworten für diese Maschinenkategorie.

Grafik INFRAS. Quelle: Befragung AP 1.

3.1.6. Potenzial weiterer alternativer Antriebe

Der Entwicklungsstand weiterer alternativer Antriebstechnologien liegt nach den Ergebnissen der Befragung und anschließender Recherchen hinter dem der batterieelektrischen Systeme zurück. Dies liegt v.a. an dem heute noch fehlenden Markt. Folgende weitere alternativen Antriebe haben das Potenzial, fossile Antriebe abzulösen, v.a. wo der batterieelektrische Antrieb Grenzen stösst (d.h. im hohen Leistungsbereich):

- Wasserstoff-Verbrennungsmotor:** Der Wasserstoff-Verbrennungsmotor hat gegenüber der Wasserstoff-Brennstoffzelle einige Vorteile bei der Anwendung in Non-Road-Maschinen. Beispielsweise braucht die Brennstoffzelle eine hohe Kühlleistung, aber die Kühlluft, die bei LKW bei höheren Geschwindigkeiten vorhanden ist, fehlt bei Non-Road-Maschinen oft. Weiter ist der Wasserstoff-Verbrennungsmotor deutlich robuster als die Brennstoffzelle, zu welcher die Erfahrungen zu Ausfallzeiten in der Anwendung bei Non-Road-Maschinen bisher ebenfalls fehlen. Die Brennstoffzelle braucht hochreinen Wasserstoff, der Verbrennungsmotor hat bezüglich Reinheit eine höhere Toleranz. Der Wirkungsgrad schliesslich ist bei Brennstoffzellen zwar im Teillastbereich sehr gut (ca. 65%), sinkt aber bei Vollast auf rund 55% - wohingegen der Wasserstoff-Verbrennungsmotor in Zukunft bis 50% erreichen könnte und somit der Nachteil des schlechten Wirkungsgrads von Verbrennungsmotoren fast entfällt.

Schliesslich wäre auch der Preis von Wasserstoff-Verbrennungsmotoren bei Serienproduktion günstiger als derjenige von Brennstoffzellen.

- **Gas** (CNG, LNG, Bio- oder synthetisches Gas): Diese Antriebsart ist gemäss Aussagen eines Interviewpartners v.a. in Südeuropa weiter verbreitet, wo die Infrastruktur vorhanden ist und ein Kostenvorteil gegenüber Diesel besteht. Die Nachteile sind jedoch, dass die Leistung nicht gut abgerufen werden kann und der Platzbedarf für die Tanks gross ist. Zudem hat Erdgas (CNG, LNG) zwar tiefere CO₂-Emissionen als Diesel, stellt jedoch höchstens einen Zwischenschritt auf dem Weg der Dekarbonisierung dar.
- **Hybride Antriebe**: Diesen wird zwar von einigen Autoren Potenzial für Non-Road-Maschinen bescheinigt (z.B. Lajunen et al. 2018) und es gibt auch aktuell einige hybride Maschinen auf dem Markt. Ihr Nachteil ist jedoch, dass das Hybridisierungskonzept auf die konkrete Anwendung abgestimmt werden muss – und aufgrund der grossen Vielfalt der von Non-Road-Maschinen ausgeführten Arbeiten ist dies schwierig. Daher lohnt es sich hauptsächlich für Maschinen/Einsatzfelder mit hohem Rekuperationspotenzial. Die Nebenverbraucher (wie Heizung, AC, Bordelektronik etc.) elektrisch betreiben zu können, wie dies etwa bei hybriden PW geschieht, fällt bei grossen Maschinen überdies nicht ins Gewicht. Das Befragungsergebnis im aktuellen Projekt stützt diesen Befund in dem Sinne, dass hybride Antriebe in den Antworten kaum genannt wurden.

3.1.7. Schlüsse aus der Marktanalyse

Der Markt für Non-Road-Maschinen wurde mittels schriftlicher Befragung diverser Akteure im Sektor, Anschlussinterviews und Internetrecherche hinsichtlich seines Elektrifizierungspotenzials zum Stand heute und bis zum Jahr 2030 untersucht. Die wichtigsten Erkenntnisse der Analyse werden in den folgenden Abschnitten zusammengefasst.

Stand heute

Non-Road-Maschinen werden heute (abgesehen von kleinen handgehaltenen Geräten, die nicht im Fokus der vorliegenden Studie stehen) überwiegend mit Diesel betrieben. (Teil-)elektrische oder andere alternative Antriebstechnologien sind nur bei wenigen Maschinenkategorien etabliert, vorwiegend für den stationären Einsatz und im unteren Leistungsbereich bis 37 kW. Für zahlenmässig wichtige Maschinenkategorien wie Traktoren gibt es derzeit kaum elektrifizierte Angebote auf dem Markt.

Erwartete Entwicklung bis 2030

Aufgrund langer Produktentwicklungszyklen, bislang fehlender Regulierungen zu Energieverbrauch und CO₂-Emissionen auf nationaler oder EU-Ebene, sowie Vorbehalten der Anwender

gegenüber den neuen Technologien werden bis 2030 die Marktanteile elektrischer, oder sonstiger alternativ angetriebener Non-Road-Maschinen nicht stark zunehmen. Zu erwarten sind folgende Entwicklungen:

- Bei Baumaschinen wird bis 2030 eine breitere kommerzielle Verfügbarkeit elektrischer Varianten im Leistungsbereich bis 37 kW erwartet, sowie bei einzelnen grösseren Maschinentypen (Bagger, Lader, Dumper). Verschiedene Ladelösungen (z.B. grosse Battery packs, Lade- und Batteriewechselstationen, Batteries as a service) werden breiter verfügbar.
- Industrie/Kommunalmaschinen: Elektrische Antriebe setzen sich im Kommunalbereich v.a. in Städten (dank politischen Umweltvorgaben und professioneller finanzieller Planung) sowie bei Staplern (wo sie bereits heute einen hohen Bestandesanteil ausmachen) durch.
- Landwirtschaft: Elektrische Antriebe werden v.a. bei hofnahen und kleineren Maschinen verfügbar. Für grössere Maschinen werden eher Biomethan-hybride oder Wasserstoff-Antriebe, sowie Bio- oder synthetische Treibstoffe erwartet – aber bis 2030 noch eher als Pilotprojekte als kommerziell verfügbare Angebote.
- Wasserstoff-Lösungen – seien es Brennstoffzellen oder Verbrennungsmotoren – werden bis 2030 erst vereinzelt am Markt verfügbar sein. Eine Ausnahme stellen möglicherweise Stapler (v.a. in gekühlten Innenbereichen, in denen Batterien schlechter funktionieren) und Notstromaggregate dar.

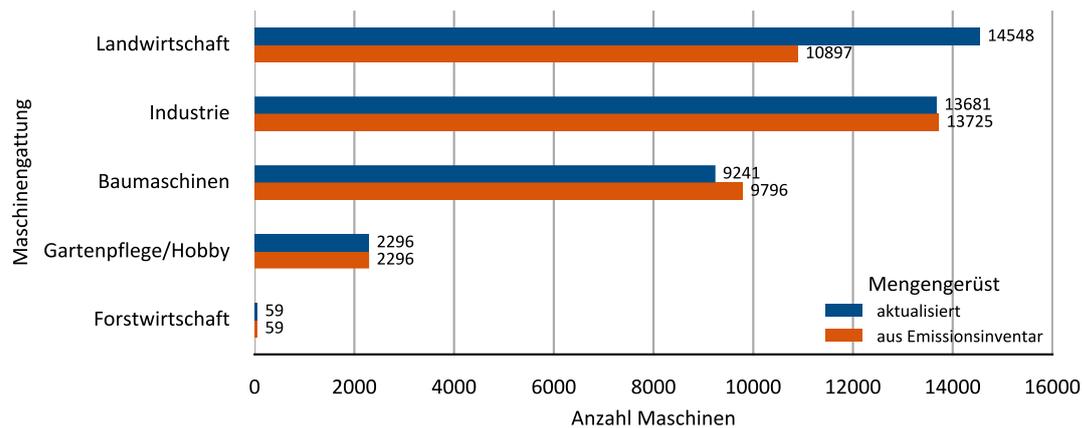
3.2. AP 2 Mengengerüst heute

3.2.1. Bestand heute

Im Kanton Zürich gibt es rund 40'000 Non-Road-Maschinen der hier betrachteten Gattungen ab 5 kW. Maschinen der Landwirtschaft, Industrie und Bauwirtschaft machen den grössten Teil des Bestandes aus (Abbildung 14; Tabelle 1Tabelle 5). Forst- und Gartenbaumaschinen haben vergleichsweise kleine Bestände. In jeder Maschinengattung trägt jeweils eine Maschinenkategorie einen grossen Teil zum Gesamtbestand bei (Landwirtschaft – 60% Traktoren, Industrie – 73% Gabelstapler, Baumaschinen – 34% Bagger, Gartenpflege/Hobby – 100% Aufsitzmäher⁴, Forstwirtschaft – 71% Seil-/Zangenschlepper; Bestände pro Maschinenkategorie im Anhang, Tabelle 14).

Nach Aktualisierung des Mengengerüsts aus dem Emissionsinventar mit Fahrzeugregistrierungen aus dem IVZ basieren rund 40% des Bestandes auf den IVZ-Daten, v.a. Maschinen der Land- und Bauwirtschaft. Nur in der Landwirtschaft ergibt sich dadurch ein deutlicher Zuwachs in der Anzahl Maschinen, der fast vollständig auf einen Zuwachs bei der Anzahl landwirtschaftlicher Traktoren zurückzuführen ist. Bei Industrie und Baumaschinen verändert sich der Bestand durch die Aktualisierung maximal 6 %; für Forstmaschinen und die Rasenmäher aus Gartenpflege/Hobby wurden keine IVZ-Daten berücksichtigt.

Abbildung 14: Mengengerüst der Non-Road-Maschinen im Kanton Zürich im Jahr 2023.



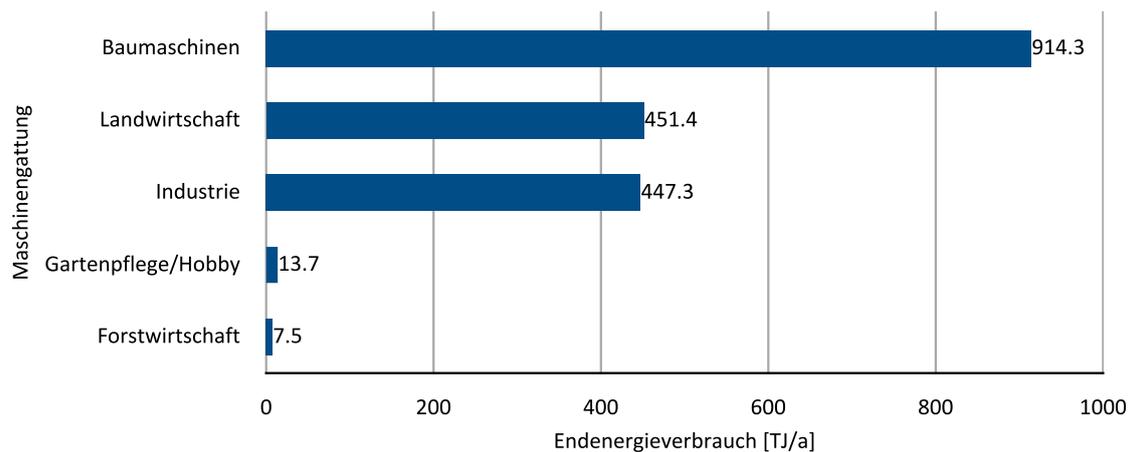
Grafik INFRAS. Quelle: Eigene Berechnungen.

⁴ In der Maschinengattung Gartenpflege/Hobby wurden im Rahmen dieser Studie nur die Aufsitzmäher als Maschinenkategorie berücksichtigt.

3.2.2. Endenergieverbrauch heute

Der Endenergieverbrauch der Non-Road-Maschinen wurde basierend auf den Betriebsdaten jeder Maschinenkategorie (spezifische Betriebsstunden, Lastfaktor, Nennleistung; BAFU, 2015) berechnet (Tabelle 5; Abbildung 15). Anders als bei der Verteilung der Bestände entfällt fast die Hälfte des gesamten jährlichen Energieverbrauchs von 1'834 TJ auf die Baumaschinen. Die andere Hälfte des Energieverbrauchs teilt sich zu gleichen Teilen auf Maschinen der Industrie und Landwirtschaft auf, während der Energieverbrauch in Gartenpflege/Hobby und Forstwirtschaft zusammen nur 1% des Gesamtverbrauchs beträgt. Die Dominanz der Baumaschinen erklärt sich durch die durchschnittlich längere Einsatzdauer und höhere Leistung im Vergleich zu anderen Maschinengattungen.

Abbildung 15: Endenergieverbrauch in TJ/a der Non-Road-Maschinen im Kanton Zürich im Jahr 2023 nach Maschinengattung.



Grafik INFRAS. Quelle: Eigene Berechnungen.

Tabelle 5: (a) Mengengerüst und (b) Endenergieverbrauch der Non-Road-Maschinen pro Maschinengattung im Kanton Zürich im Jahr 2023.

Maschinengattung	(a) Mengengerüst	(b) Endenergieverbrauch (in TJ/a)
Baumaschinen	9'241	914
Landwirtschaft	14'548	451
Industrie	13'681	447
Forstwirtschaft	59	14
Gartenpflege/Hobby	2'296	7
Total	39'825	1'834

3.3. AP 3 Substitutions- und Reduktionspotenzial bis 2030

3.3.1. Übersicht

Aufgrund der verzögerten Reaktion des Maschinenbestandes (aller Altersklassen) auf Veränderungen der antriebstechnologischen Zusammensetzung der Neuzugänge hat die Dekarbonisierung bis 2030 noch relativ geringe Auswirkungen auf die Zusammensetzung des Maschinenparks, und somit auch auf Energieverbrauch und Emissionen. Die Auswirkungen der Elektrifizierung entfalten erst später, d.h. ausserhalb des betrachteten Zeitrahmens, ihre volle Wirksamkeit.

Die folgenden Unterkapitel gehen detaillierter auf die Auswirkungen der Dekarbonisierung auf den Maschinenbestand sowie Energieverbrauch und Emissionen ein.

3.3.2. Bestandesentwicklung

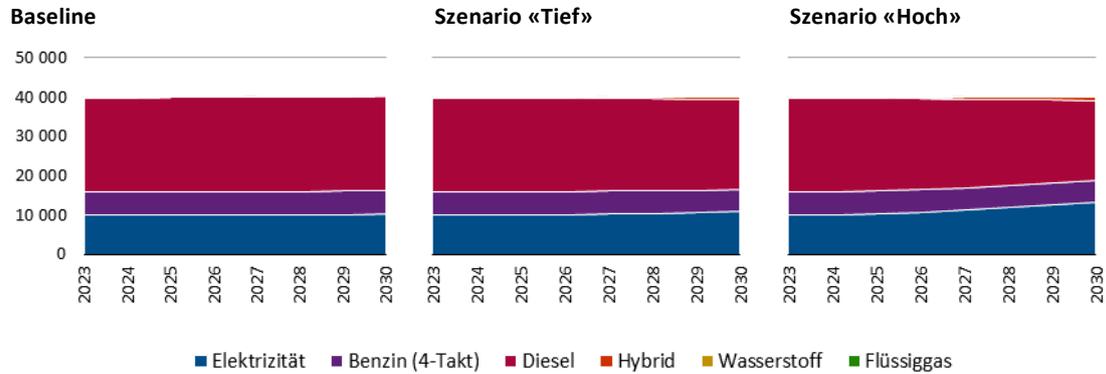
Aufgrund der verzögerten Reaktion des Maschinenbestandes (aller Altersklassen) auf Veränderungen bei den Neuzugängen hat die Dekarbonisierung bis 2030 noch relativ geringe Auswirkungen auf die Zusammensetzung des Maschinenparks hinsichtlich Antriebstechnologien.

Der **Gesamtbestand** der in der vorliegenden Studie betrachteten Non-Road-Maschinen im Kanton Zürich wächst gemäss der auf dem schweizerischen Emissionsinventar (BAFU 2015) basierenden Prognose (welche wiederum langjährige Trends z.B. des BIP oder der landwirtschaftlichen Nutzfläche berücksichtigt) zwischen 2023 und 2030 nur leicht, um gut 1% - wobei der Bestand der Baumaschinen mit gut 3% am stärksten zunimmt, während die landwirtschaftlichen Maschinen um ca. 1% abnehmen. Der Bestand pro Maschinenkategorie unterscheidet sich in den betrachteten Szenarien nicht, da die erwähnten technologie-unabhängigen Einflussfaktoren für alle Szenarien gleich gelten.

Von Interesse ist hier aber primär die **Zusammensetzung hinsichtlich Antriebstechnologien** (Abbildung 16):

- In der Baseline bleibt sie gemäss Input-Annahmen (s. Kapitel 2.3) konstant. Zu beachten ist, dass bereits heute rund 25.3% aller betrachteten Maschinen elektrisch angetrieben sind – dabei handelt es sich um Gabelstapler, bei welchen traditionell über die Hälfte der Maschinen – teils in Innenräumen – elektrisch betrieben wird.
- In den Szenarien «Tief» und «Hoch» reagiert der Maschinenpark aufgrund der älteren Maschinen, die nur langsam aus dem Bestand verschwinden, erst mit einer Verzögerung von mehreren Jahren (abhängig von der Altersstruktur der verschiedenen Maschinentypen) auf die Veränderung der Technologie-Zusammensetzung der Neuzugänge. Daher nimmt der elektrische Bestandesanteil bis 2030 in beiden Szenarien nur geringfügig zu:
 - Im Szenario «Tief» um 2.3% auf insgesamt 27.6%
 - Im Szenario «Hoch» um 6.5% auf insgesamt 31.8%

Abbildung 16: Bestandesentwicklung nach Antriebstechnologien im Szenarienvergleich, 2023-2030.

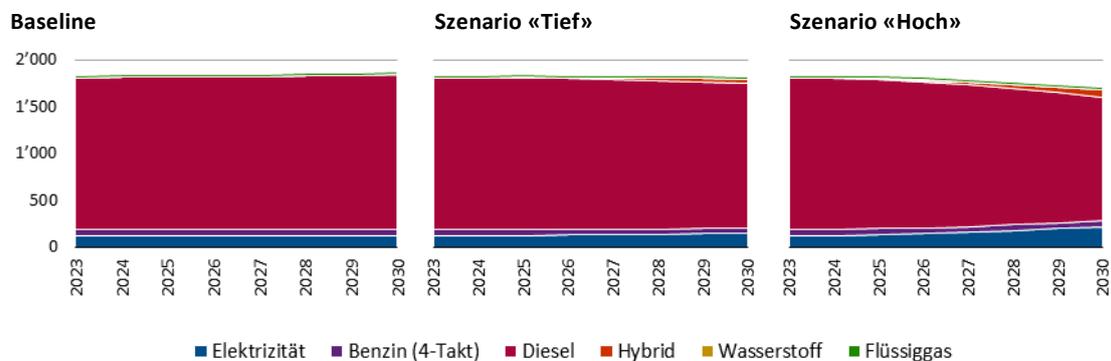


3.3.3. Endenergieverbrauch

Entsprechend der verzögerten Reaktion des Maschinenbestandes auf die Neuzugänge elektrischer Maschinen bleibt auch die Auswirkung der Dekarbonisierung auf den Endenergieverbrauch bis 2030 limitiert. Die folgenden Einsparungen können ggü. der Baseline erreicht werden (s. auch Abbildung 17):

- In Szenario «Tief» beträgt die Einsparung im Jahr 2030 2.3% des Endenergieverbrauchs der Baseline, oder 43 TJ. Im gesamten betrachteten Zeitraum (2023-2030) beträgt die Einsparung 137 TJ.
- In Szenario «Hoch» beträgt die Einsparung im Jahr 2030 8.7% des Endenergieverbrauchs der Baseline, oder 163 TJ. Im gesamten betrachteten Zeitraum (2023-2030) beträgt die Einsparung 501 TJ.

Abbildung 17: Endenergieverbrauch [TJ/a] nach Antriebstechnologien im Szenarienvergleich, 2023-2030.

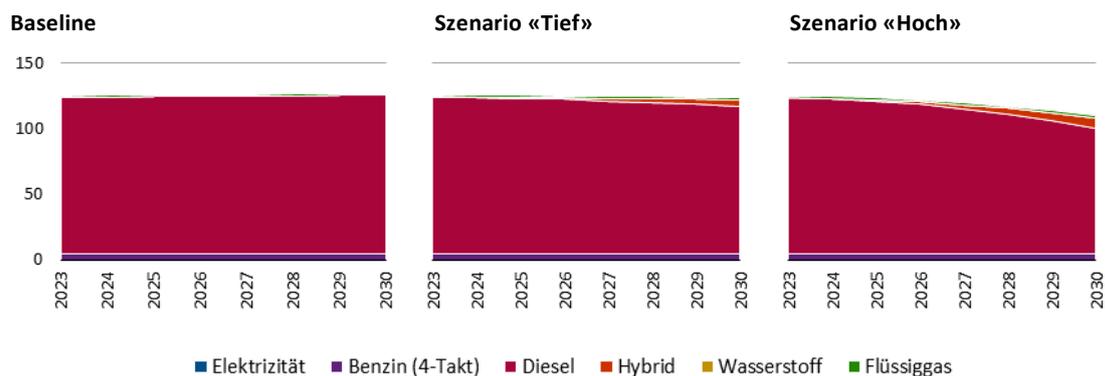


3.3.4. CO₂-Emissionen

Auch bei den CO₂-Emissionen bleibt die Reduktion durch die Elektrifizierung bis 2030 in beiden Szenarien relativ gering – allerdings fällt sie in Prozentpunkten ausgedrückt etwas höher aus als die Reduktion des Energieverbrauchs, da elektrische (und Wasserstoff-betriebene) Maschinen im Betrieb gar kein CO₂ ausstossen (s. auch Abbildung 18):

- In Szenario «Tief» beträgt die Einsparung im Jahr 2030 2.7% der CO₂-Emissionen der Baseline, oder 3'400 t. Im gesamten betrachteten Zeitraum (2023-2030) beträgt die Einsparung 11'300 t CO₂.
- In Szenario «Hoch» beträgt die Einsparung im Jahr 2030 13.6% der CO₂-Emissionen der Baseline, oder 17'300 t. Im gesamten betrachteten Zeitraum (2023-2030) beträgt die Einsparung 53'600 t CO₂.

Abbildung 18: CO₂-Emissionen [1000 t/a] nach Antriebstechnologien im Szenarienvergleich, 2023-2030.



3.3.5. Luftschadstoff-Emissionen

Das relative Reduktionspotenzial durch die Dekarbonisierung liegt bei den Luftschadstoffemissionen - zumindest bei den hier betrachteten gesetzlich regulierten Luftschadstoffe Stickoxide (NO_x) und Feinstaub (PM₁₀) – nochmals höher als bei den CO₂-Emissionen. Dies liegt daran, dass sich v.a. bei kleineren Maschinen elektrische Antriebe durchsetzen; diese müssen weniger strenge Luftschadstoff-Grenzwerte (in Gramm pro Kilowattstunde) einhalten als die grösseren Maschinen. Beispielsweise gilt der niedrige NO_x-Grenzwert von 0.4 g/kWh für dieselbetriebene Maschinen der EU-Stage V nur für Maschinen mit Nennleistungen zwischen 56 und 560 kW. Kleinere Maschinen bis 37 kW dürfen 7.5 g HC+NO_x ausstossen (der Grenzwert gilt für die Summe beider Schadstoffe, wobei die reinen HC-Grenzwerte in den EU-Stages in absoluten Zahlen tendenziell niedriger sind als die reinen NO_x-Grenzwerte), solche zwischen 37 und 56

kW immer noch 4.5 g HC+NOx. Beim Feinstaub sind die Grenzwerte anders, das Prinzip jedoch ähnlich. Sehr grosse Maschinen über 560 kW Nennleistung sind in der Schweiz sehr selten.

Folgende Emissionsreduktionen werden geschätzt (s. Abbildung 19 und Abbildung 19: NOx-Emissionen [t/a] nach Antriebstechnologien im Szenarienvergleich, 2023-2030.

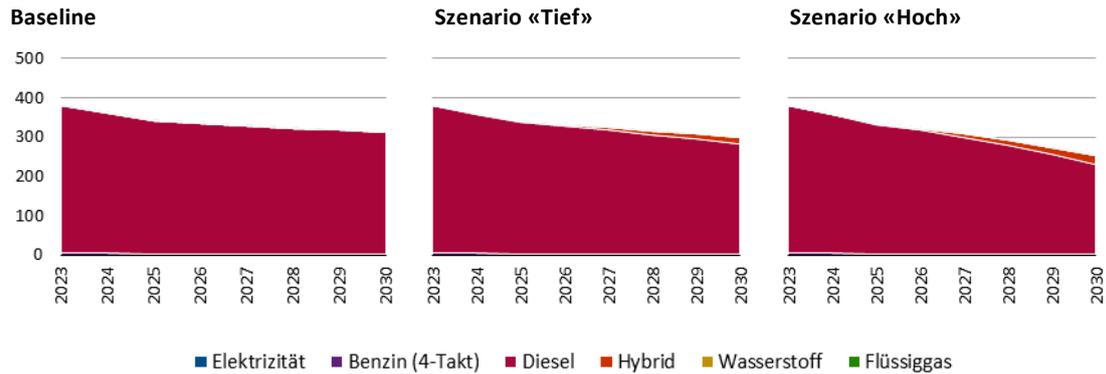
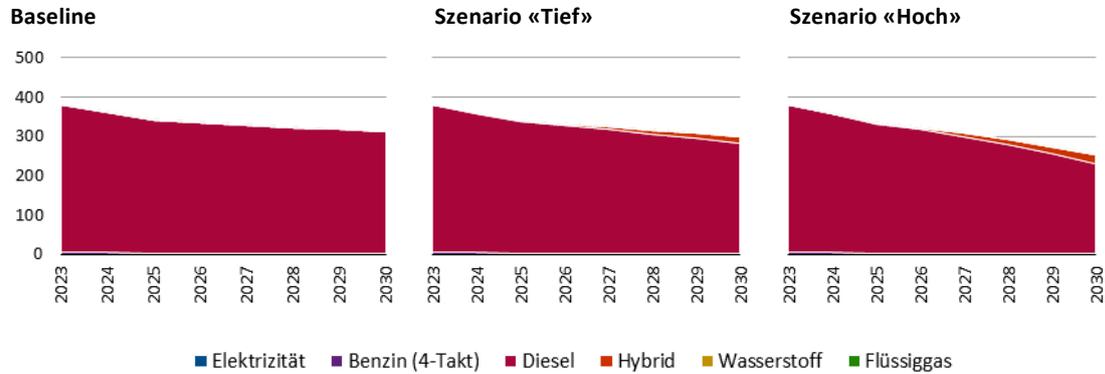
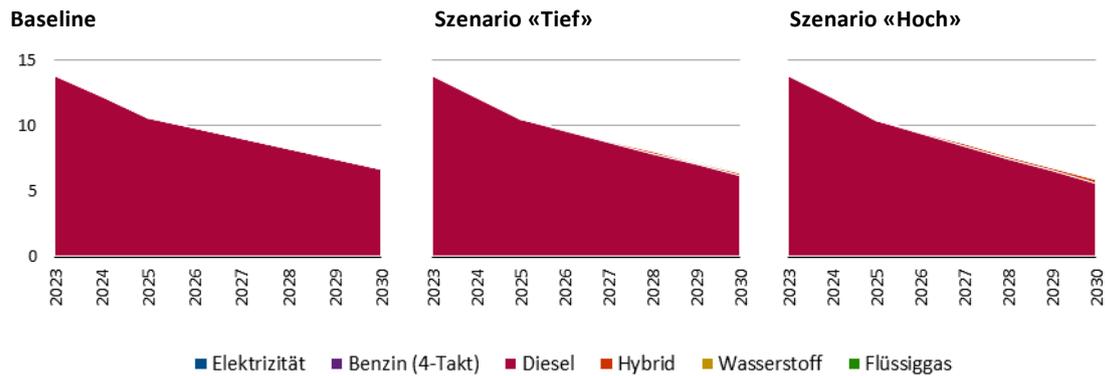


Abbildung 20):

- In Szenario «Tief» beträgt
 - die Einsparung der NOx-Emissionen im Jahr 2030 4.2% der Baseline, oder 13 t. Im gesamten betrachteten Zeitraum (2023-2030) beträgt die Einsparung 40 t NOx;
 - die Einsparung der PM10-Emissionen im Jahr 2030 3.6% der Baseline, oder 0.2 t. Im gesamten betrachteten Zeitraum (2023-2030) beträgt die Einsparung 1.1 t PM10.
- In Szenario «Hoch» beträgt
 - die Einsparung der NOx-Emissionen im Jahr 2030 18.6% der Baseline, oder 58 t. Im gesamten betrachteten Zeitraum (2023-2030) beträgt die Einsparung fast 180 t NOx;
 - die Einsparung der PM10-Emissionen im Jahr 2030 11.2% der Baseline, oder 0.7 t. Im gesamten betrachteten Zeitraum (2023-2030) beträgt die Einsparung 2.9 t PM10.

Abbildung 19: NO_x-Emissionen [t/a] nach Antriebstechnologien im Szenarienvergleich, 2023-2030.Abbildung 20: PM₁₀-(Abgas-)Emissionen [t/a] nach Antriebstechnologien im Szenarienvergleich, 2023-2030.

3.4. AP 4 Entwicklung Fördermassnahmen zur Dekarbonisierung

3.4.1. Übersicht

Eine Übersicht zu allen vorgeschlagenen Fördermassnahmen, klassifiziert nach Handlungsfeld bzw. Art der Massnahme und Nutzungsphase der Maschinen, zeigt Tabelle 6. Die finale Bewertung der Massnahmen nach Wirkung und Umsetzbarkeit ist in Abbildung 21 dargestellt.

In den Kapiteln 3.4.2 bis 3.4.5 sind die Massnahmen nach Handlungsfeld beschrieben; die Bewertung wird begründet und es wird, wo vorhanden und bekannt, auf Beispiele von Umsetzungen in anderen Landesteilen und Ländern verwiesen.

Abschliessend werden die vielversprechendsten Ansätze für Fördermassnahmen zusammengefasst und übergeordnete Aspekte diskutiert, die die Gestaltung der Fördermassnahmen beeinflussen könnten (Kapitel 0).

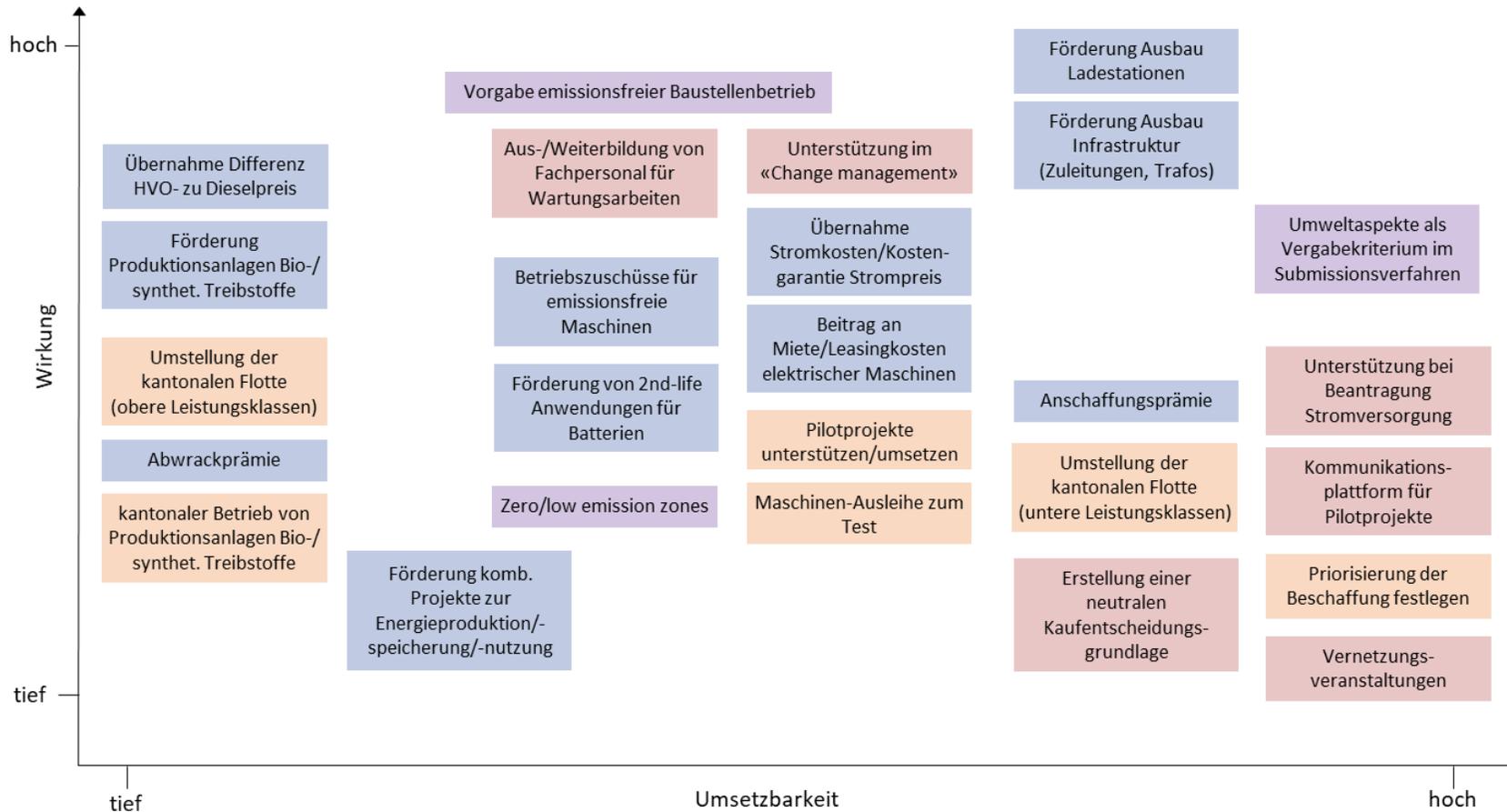
Der Fokus der vorgeschlagenen Fördermassnahmen liegt auf denjenigen, die vom Kanton umgesetzt werden könnten. Auf Bundes- oder Gemeindeebene angesiedelte Massnahmen wurden am Workshop zwar mitdiskutiert. Sie werden im Folgenden aber nicht im Detail beschrieben, sondern nur im einführenden Text zum jeweiligen Handlungsfeld erwähnt. Dies betrifft insbesondere das Handlungsfeld Regulierung (Kapitel 3.4.3).

Tabelle 6: Übersicht der vorgeschlagenen Fördermassnahmen nach Maschinen-Nutzungsphase (Zeilen) und Handlungsfeld (Spalten).

	Finanzierung	Regulierung	Projekt-/Wissensunterstützung	Vorbild Kanton
Anschaffung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Anschaffungsprämie ▪ Abwrackprämie ▪ Förderung von 2nd-Life-Anwendungen für Batterien 		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Erstellung einer neutralen Kaufentscheidungsgrundlage 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Umstellung der kantonalen Flotte ▪ Priorisierung der Beschaffung festlegen
Energieversorgung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Förderung Ausbau Infrastruktur (Zuleitungen, Trafos) ▪ Förderung Ausbau Ladestationen ▪ Übernahme Stromkosten / Kostengarantie für Strompreis ▪ Kostenübernahme für Netzaufgrade ▪ Übernahme Differenz HVO- zu Dieselpreis ▪ Förderung Produktionsanlagen Bio-/synthetische Treibstoffe ▪ Förderung von kombinierten Projekten zur Energieproduktion/-speicherung/-nutzung 		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Unterstützung bei Beantragung Stromversorgung 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ kantonaler Betrieb von Produktionsanlagen Bio-/synthetische Treibstoffe
Betrieb	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Betriebszuschüsse für emissionsfreie Maschinen ▪ Beitrag an Miete/Leasingkosten elektrischer Baumaschinen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Umweltaspekte als Vergabekriterium im Submissionsverfahren ▪ Vorgabe klimaneutraler, emissionsfreier oder fossilfreier Baustellenbetrieb ▪ Zero/low emission zones 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Unterstützung im «Change management» ▪ Aus/Weiterbildung von Fachpersonal für Wartungsarbeiten ▪ Vernetzungsveranstaltungen ▪ Kommunikationsplattform für Pilotprojekte 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pilotprojekte unterstützen/umsetzen ▪ Maschinen-Ausleihe zum Test

Die Schriftfarbe bezeichnet die Maschinengattung(en), für welche die Massnahmen angewendet werden können: Alle Maschinengattungen (schwarz) oder nur Baumaschinen (blau).

Abbildung 21: Bewertung der Fördermassnahmen nach Wirkung und Umsetzbarkeit. Die Farbgebung entspricht den Handlungsfeldern aus Tabelle 6.



Handlungsfelder in Farben: Finanzierung | Regulierung | Projekt-/Wissensunterstützung | Vorbild Kanton

Grafik INFRAS. Quellen: Workshop vom 22.05.2024, Einschätzung INFRAS.

3.4.2. Handlungsfeld Finanzierung

Zum Handlungsfeld Finanzierung gehören alle Massnahmen, in denen der Kanton die Elektrifizierung der Non-Road-Maschinen mit finanziellen Mitteln fördert (Tabelle 7). Dabei könnten u.a. einmalige Kosten für den Aufbau der kritischen Infrastruktur oder die Anschaffung der Maschinen übernommen werden oder Kosten, die laufend beim Betrieb anfallen. Welche Finanzierungsinstrumente der Kanton dafür nutzen kann, wird nicht als Teil von AP 4 diskutiert. Geprüft werden könnte zum Beispiel der Einsatz finanzieller Mittel aus dem «[Förderprogramms Ladeinfrastruktur](#)»⁵ im Kanton Zürich.

Im Workshop wurde eine mögliche Kostenübernahme der [vorgezogenen Entsorgungsbühr \(VEG\)](#)⁶ diskutiert: In der Schweiz besteht eine Rückgabepflicht für gebrauchte Batterien. Die VEG deckt Kosten für ihre Sammlung, Transport und stoffliche Verwertung, berechnet sich abhängig vom Batteriegewicht und wird vom Hersteller mit dem Kaufpreis an die Käufer:innen weitergegeben. Der Anschaffungspreis für Käufer:innen würde sich senken, wenn die VEG vom Kanton übernommen wird. Allerdings gilt die VEG für die gesamte Schweiz, eine solche Massnahme müsste demnach auf Bundesebene entwickelt werden.

⁵ <https://www.zh.ch/de/mobilitaet/gesamtverkehrsplanung/dinamo/foerderprogramm-ladeinfrastruktur.html> (Zugriff am 7.6.2024)

⁶ <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/abfall/abfallwegweiser-a-z/batterien.html> (Zugriff am 7.6.2024)

Tabelle 7: Vorschläge für Fördermassnahmen im Handlungsfeld Finanzierung und ihre Bewertung.

Massnahme/Anreiz	Bewertung Begleitgruppe und INFRAS
1 – Anschaffung	
<p>Anschaffungsprämie</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Die Höhe der Prämie kann abhängig von Anschaffungspreis, Leistung der Maschine, Klimaschutzwirkung gestaltet werden. ▪ Förderprogramme für E-Baufahrzeuge: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Programm KliK⁷: 4-16 kCHF, bzw. 200 CHF/tCO₂ ▪ Enova (Norwegen)⁸: 40% der Mehrkosten, max. 400 kCHF pro Projekt 	<p>Wirkung mittel, Umsetzbarkeit hoch</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Wirkung: Es können zwar theoretisch alle Anwender von der Massnahme profitieren, aber: <ol style="list-style-type: none"> a) Es besteht das Risiko, dass Hersteller:innen die Anschaffungsprämie auf den Kaufpreis aufschlagen, sodass die Anschaffungskosten für Käufer:innen trotz Prämie nicht sinken. b) Da bereits das Programm von KliK besteht (s. links), sollte dieses in erster Linie ausgeschöpft werden; der Kanton Zürich kann dann ergänzen. ▪ Umsetzbarkeit: Die Massnahme wurde bereits in anderen Bereichen E-Mobilität und in anderen Ländern für Non-Road-Maschinen umgesetzt.
<p>Abwrackprämie</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Anwender:innen erhalten für die Rückgabe ihrer fossil betriebenen Maschinen eine Prämie, die sie in die Anschaffung einer Maschine mit alternativem Antrieb investieren. 	<p>Wirkung mittel, Umsetzbarkeit tief</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Wirkung: Ähnlich der Anschaffungsprämie, zumindest wenn die neue Ersatzmaschine dieselben Bedingungen erfüllen muss wie bei der Anschaffungsprämie ▪ Umsetzbarkeit: Technisch kaum Hindernisse; ökonomisch und praktisch ist die Anschaffungsprämie vorzuziehen (erzielt eher einen Multiplikatoreffekt z.B. via Skaleneffekte auf dem Maschinenmarkt); politisch hat ebenfalls die Anschaffungsprämie höhere Akzeptanz
<p>Förderung von 2nd-life Anwendungen für Batterien</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Maschinenbatterien können weiterhin z.B. in stationären Speichersystemen eingesetzt werden, als Puffer für Ladeinfrastrukturen in Zeiten hoher Auslastung (z.B. ecovolta AG⁹) 	<p>Wirkung: mittel, Umsetzbarkeit: mittel</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Wirkung: Der Wiederverkaufswert der Maschine wird gesteigert. ▪ Umsetzbarkeit: Keine offensichtlichen Hürden, aber Umsetzungsbeispiele fehlen.

⁷ <https://www.klik.ch/schweiz/verkehr/e-baufahrzeuge/foerderung> (Zugriff am 7.6.2024)

⁸ <https://www.enova.no/bedrift/bygg-og-eiendom/utslippsfrie-anleggsmaskiner/> (Zugriff am 7.6.2024)

⁹ <https://eco-volta.com/> (Zugriff am 7.6.2024)

2 – Energieversorgung

Förderung Grundinstallation

- Ausbau von Zuleitungen und Trafos zur Sicherung der Stromversorgung, sowie Förderung Lastmanagement, z.B. für Ladestationen oder an Baustellen.

Wirkung hoch, Umsetzbarkeit hoch

- Wirkung: Hohe direkte Wirkung (betrifft potenziell alle Maschinen) mit Multiplikatoreffekt, da die Grundinstallation oft ein Haupthindernis für eine Elektrifizierung darstellt, weil sie sich initial – für wenige Maschinen - nicht lohnt. Ist sie vorhanden, können einfacher mehr elektrische Maschinen hinzukommen.
- Umsetzbarkeit: Der Ausbau ist zwar mit hohem Aufwand (z.T. Umbau Siedlungsstruktur) und hohen Kosten verbunden. Stromversorger haben jedoch ökonomisches Interesse. Der Multiplikatoreffekt unterstützt die Akzeptanz. Massnahme wird für Elektro-PW bereits umgesetzt.

Förderung Ladestationen

- Förderung der Ladestation selbst (Schnellladestationen)
- Beispiel [Enova \(Norwegen\)](https://www.enova.no/bedrift/bygg-og-eiendom/mobile-ladestasjon-for-elektriske-anleggsmaskiner/)¹⁰: Förderprogramm für mobile Batterieladestationen mit Schnellladung. Bis 40% der Kosten werden übernommen, max. 166 kCHF.

Wirkung hoch, Umsetzbarkeit hoch

- Wirkung: Der Ausbau ist technisch möglich und wird nur durch die Finanzierung eingeschränkt. Die Massnahme wird als bedeutender Hebel bewertet, da die fehlende Ladeinfrastruktur eines der grössten Hindernisse für das Voranschreiten der Elektrifizierung darstellt. Zielvorgaben zu Emissionsreduktionen erhöhen den Druck, elektrisch betriebene Maschinen zu beschaffen – sie können aber nur dann eingesetzt werden, wenn auch geladen werden kann.
- Umsetzbarkeit: Massnahme wird für Elektro-PW bereits umgesetzt, im Ausland auch für Baumaschinen

Kostengarantie Strompreis / Übernahme Stromkosten

- Kanton bezahlt die Stromkosten, die auf einer Baustelle anfallen, bzw. garantiert einen konstant Strompreis.
- Garantie/Übernahme ist gültig für die Dauer des Bauvorhabens

Wirkung mittel, Umsetzbarkeit hoch

- Wirkung: Die Kostenübernahme und Garantie sichern Bauunternehmer ab und erleichtern die Planung. Dies vereinfacht die Umsetzung elektrifizierter Bauprojekten und ermöglicht es, Erfahrungswerte zu sammeln.
- Umsetzbarkeit: Die Höhe der Stromkosten sollte für den Kanton gut tragbar sein. In Oslo bereits umgesetzt.

¹⁰ <https://www.enova.no/bedrift/bygg-og-eiendom/mobile-ladestasjon-for-elektriske-anleggsmaskiner/> (Zugriff am 7.6.2024)

Übernahme Differenz HVO- zu Dieselpreis

- Kanton bezahlt die geschätzten 20 – 30 Rappen Aufpreis von HVO im Vergleich zum Dieselpreis

Wirkung mittel, Umsetzbarkeit tief

- Wirkung: Kann rasch auf alle bestehenden Maschinen angewendet werden. Aber:
 - a) Es fallen hohe laufende Kosten ohne Multiplikatoreffekt an
 - b) Co-Benefits der Elektrifizierung wie Lärm- und Luftschadstoffreduktion fallen weg
 - c) Die Verfügbarkeit von HVO ist begrenzt
 - d) die Massnahme könnte Fördermassnahmen zur Elektrifizierung konkurrenzieren/unterlaufen
- Umsetzbarkeit: Technisch einfach, aber aus obengenannten Gründen ökonomisch nicht ratsam. Die politische Akzeptanz wird entsprechend niedrig eingeschätzt.

Förderung Produktionsanlagen Bio-/ synthet. Treibstoffe

- Kanton fördert lokale Produktion von synthetischen oder Biotreibstoffen

Wirkung mittel, Umsetzbarkeit tief

- Wirkung: Ähnliche Begründung wie bei der Übernahme HVO- zu Dieselpreis (s. oben) – mit dem Unterschied, dass die Massnahme wohl selbst nicht die gleiche Menge Treibstoff verbilligt, aber dafür das Problem dessen begrenzten Verfügbarkeit lösen hilft
- Umsetzbarkeit: Die politische Akzeptanz wird niedrig eingeschätzt.

Förderung von kombinierten Projekten zur Energieproduktion/-speicherung/-nutzung

- Beispiel: Die Installation einer PV-Anlage wird gefördert, wenn die produzierte Energie nachweislich für den Betrieb einer elektrifizierter Maschine genutzt wird.

Wirkung tief bis mittel, Umsetzbarkeit tief bis mittel

- Wirkung: Autonomie von Betrieben wird gefördert, aber Zusatznutzen im Vergleich zu einer reinen Förderung von Energieproduktionsanlagen ist unklar
- Umsetzbarkeit: Geforderter Nachweis, dass Strom für den Betrieb elektrifizierter Maschinen genutzt wird, erschwert Umsetzung.
- Es sollte daher eher die Produktion erneuerbarer Energien gefördert werden, ohne diese an Nutzungsbedingungen zu knüpfen

3 – Betrieb**Betriebszuschuss für den Einsatz von emissionsfreien Maschinen**

- [Programm Klik¹¹](https://www.klik.ch/schweiz/verkehr/e-baufahrzeuge/foerderung): Abh. von der Klimaschutzwirkung wird im Anschluss an die Anschaffungsprämie eine Betriebsprämie geleistet.
- [Norwegische Strassenverkehrsbehörde¹²](#): Boni für den Einsatz emissionsfreier Baumaschinen (Bagger > 16 t mit 4 CHF/h bis max. 8 k CHF, Bagger > 25 t mit 7 CHF/h bis max. 14 k CHF)

Wirkung mittel bis hoch, Umsetzbarkeit mittel

- Wirkung: Risiko der noch weitgehend unbekanntem Betriebskosten wird minimiert, so dass mehr Anwender:innen eine Umstellung wagen und Erfahrungen mit elektrifizierten Maschinen sammeln können. Allerdings besteht bei klik bereits entsprechende Massnahme, so dass Kanton Zürich nur ergänzen kann
- Umsetzbarkeit: Massnahme bereits im In- und Ausland umgesetzt.

¹¹ <https://www.klik.ch/schweiz/verkehr/e-baufahrzeuge/foerderung> (Zugriff am 7.6.2024)

¹² [SINTEF Open: Lessons learnt from green public procurement within the construction sector in Norway \(unit.no\)](#)

Beitrag an Miete/Lease von elektrischen Maschinen

- Kanton leistet einen finanziellen Beitrag an die Miete elektrischer Maschinen (welche einem privaten Vermieter gehört – im Unterschied zur Massnahme zum Maschinenverleih in Kapitel 3.4.5, bei welcher der Kanton die Mietmaschinen besitzen würde). Analog Anschaffungsprämie, vor Hintergrund, dass viele Non-Road-Maschinen gemietet/geleast und nicht gekauft werden.

Wirkung hoch, Umsetzbarkeit mittel

- Wirkung: Durch Miete/Leasing wird das Kaufrisiko eliminiert, sodass mehr Anwender:innen eine Umstellung wagen und Erfahrungen mit elektrifizierten Maschinen sammeln können.
- Umsetzbarkeit: Analog Betriebszuschuss

3.4.3. Handlungsfeld Regulierung

Im Handlungsfeld Regulierung werden Massnahmen vorgeschlagen, die die regulatorischen Rahmenbedingungen für Anschaffung und Betrieb der Maschinen betreffen (Tabelle 8). So kann Druck auf die Akteure im Non-Road-Maschinensektor ausgeübt werden, die Dekarbonisierung ihrer Maschinen voranzutreiben.

In diesem Handlungsfeld gibt es potenziell wirkungsvolle Massnahmen, die aber auf Bundesebene angesiedelt und somit für den Kanton Zürich nicht umsetzbar sind. Dies betrifft zum Beispiel die Einführung von CO₂-Flottengrenzwerten (s. BFE 2023) oder von Lärmgrenzwerten (BAFU 2023).

Tabelle 8: Vorschläge für Fördermassnahmen im Handlungsfeld Regulierung und ihre Bewertung.

Massnahme/Anreiz	Bewertung
3 – Betrieb	
Umweltaspekte als Vergabekriterium in Submissionsverfahren aufnehmen <ul style="list-style-type: none"> ▪ In Ausschreibungen werden emissionsfreie oder -reduzierte (z.B. via Einsatz von Biotreibstoffen) Baustellenbetriebe als Zuschlagskriterium bewertet. ▪ Beispiel Oslo¹³: Bauprojekte ab 500k CHF gewichten Umweltaspekte bei der Vergabe mit mind. 20%. ▪ Der Bauherr ist für Submissionsverfahren und entsprechende Vergabekriterien zuständig 	Wirkung mittel bis hoch, Umsetzbarkeit hoch <ul style="list-style-type: none"> ▪ Wirkung: Die Gewichtung erzeugt Anreize für Hersteller:innen und Auftragnehmer:innen, Angebote mit alternativen Antriebstechnologien zu erstellen. ▪ Der Kanton kann die Massnahme für eigene Bauprojekte umsetzen. Für Projekte unter Bauherrschaft von Gemeinden (z.B. Stadt Zürich) kann er sie empfehlen – die Umsetzung liegt bei den Gemeinden. ▪ Umsetzbarkeit: Die Massnahme wurde im Ausland für Baumaschinen umgesetzt.

¹³ <https://www.stadt-zuerich.ch/content/dam/stzh/hbd/Deutsch/Hochbau/Weitere%20Dokumente/Bauen-2000-Watt/Grundlagen-Studienergebnisse/NB/2022/2022-08-nb-E-Baustelle-Schlussbericht.pdf> (Zugriff am 7.6.2024)

Vorgabe klimaneutraler, emissionsfreier, oder fossilfreier Baustellenbetriebe

- Der Einsatz bestimmter Technologien/Maschinen auf Baustellen wird vorgeschrieben. Dafür sind verschiedene Varianten, oder auch Kombinationen daraus, denkbar (s. auch Stadt Zürich 2022):
 - Auf «klimaneutralen» Baustellen werden Treibhausgasemissionen «soweit möglich» reduziert, die verbleibenden Emissionen werden (mit Zertifikaten) kompensiert
 - «Fossilfreie» Baustellen: Fossile Energieträger sind verboten, bio- oder synthetischen Treibstoffe sind erlaubt
 - Auf «emissionsfreien» Baustellen sind nur elektrische oder Brennstoffzellen-Antriebe erlaubt.
 - Es sind schrittweise Verschärfungen möglich.
- Beispiele:
 - [SBB \(2021\)](#)¹⁴: «In künftigen Ausschreibungen wird die Emissionsfreiheit eingefordert»
 - [Norwegische Strassenverkehrsbehörde](#)¹⁵ schreibt ab Ende 2027 Nullemissionen in ihren Ausschreibungen vor.
 - [Trondheim Norwegen](#)¹⁶: Fossilfreie Baustellen/-maschinen sind gefordert, wenn diese praktikabel und ökonomisch durchführbar sind.
 - Digitaler «Kriterienassistent» für öffentliche Ausschreibungen in Norwegen: [Kriterieveiviseren \(anskaffelser.no\)](#)¹⁷

Wirkung hoch, Umsetzbarkeit mittel

- Hohe Wirkung, weil für alle Baustellen gültig.
- Umsetzbarkeit: Bei weniger strikten Varianten, in Kombination mit finanziellen Unterstützungsmassnahmen (s. vorhergehendes Kapitel), oder bei schrittweisem Vorgehen ist die Akzeptanz mutmasslich höher als bei strikten, auf einmal eingeführten Massnahmen.

¹⁴ <https://data.sbb.ch/explore/dataset/baugerateliste/information/> (Zugriff am 7.6.2024)

¹⁵ <https://www.miljodirektoratet.no/sharepoint/downloaditem?id=01FM3LD2SXRWFZFLENZICUIDHRJFNXDRM> (Zugriff am 7.6.2024)

¹⁶ ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2787840 (Zugriff am 7.6.2024)

¹⁷ <https://kriterieveiviseren.anskaffelser.no/>

Zero/low emission zones

- Für bestimmte Gebiete gelten besondere Emissionsanforderungen, z.B. emissionsfreie Antriebe oder die Erfüllung bestimmter Emissionsstandards (wie EU-Stage V für Non-Road-Maschinen). Da geografisch auf bestimmte Gebiete (z.B. Stadtzentren) mit Luftqualitätsproblemen beschränkt, wird sie mit Luftqualität und nicht mit Klimaschutz begründet. Sie kann auch zeitlich beschränkt (z.B. beim Überschreiten bestimmter Schadstoffkonzentrationen in der Luft) in Kraft treten.
- Beispiel: [Stick'Air in Genf](#)¹⁸: Abhängig von der momentanen Luftverschmutzung wird zeitweise der Betrieb fossil betriebener Fahrzeuge in definierten Stadtzonen verboten.

Wirkung mittel, Umsetzbarkeit mittel

- Die Wirkung ist davon abhängig, wie gross die betroffenen Gebiete sind, wie viele Aktivitäten von Non-Road-Maschinen darin stattfinden und wie eine allfällige zeitliche Beschränkung ausgestaltet ist. Die Massnahme kann aber eine Wirkung über die direkt betroffenen Gebiete und Zeiten entfalten, da sie einen Anreiz für die Beschaffung emissionsfreier Maschinen setzt. Sie kann aber auch dazu führen, dass ältere Maschinen öfter ausserhalb der betroffenen Orte und Zeiten eingesetzt werden.
- Umsetzbarkeit: Die Massnahme wurde im In- und Ausland für Strassenfahrzeuge umgesetzt. Non-Road-Maschinen sind aber z.T. explizit ausgenommen (z.B. in Genf¹⁹)

3.4.4. Handlungsfeld Projekt-/Wissensunterstützung

Auch wenn die technischen und finanziellen Möglichkeiten für die Elektrifizierung einer Maschine gegeben sind, muss auch die Bereitschaft der Hersteller:innen und Nutzer:innen vorhanden sein, die Elektrifizierung umzusetzen. Oft fehlen Wissen und Erfahrung, wie Prozesse bei einer Elektrifizierung angepasst werden können oder welche Kosten, welcher Nutzen zu erwarten ist. Massnahmen aus dem Handlungsfeld Projekt-/Wissensunterstützung, die z.B. den Erfahrungsaustausch fördern, können diese Lücken füllen.

Tabelle 9: Vorschläge für Fördermassnahmen im Handlungsfeld Projekt-/Wissensunterstützung und ihre Bewertung.

Massnahme/Anreiz	Bewertung
1 – Anschaffung	
Erstellung einer neutralen Kaufentscheidungsgrundlage	Wirkung tief bis mittel, Umsetzbarkeit mittel bis hoch
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Der Kanton stellt eine Broschüre mit objektiven Kriterien zur Verfügung, welche potenziellen Käufern von Maschinen eine faktenbasierte Bewertung/Entscheidung erlaubt. Sie enthält z.B. Informationen zu Kosten, Regulationen, Umwelt- und Gesundheitswirkungen und allfälligen Prozess-Umstellungen. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Wirkung: Vorbehalte gegenüber alternativen Antriebstechnologien können aufgefangen werden. ▪ Umsetzbarkeit: Die Erstellungskosten einer solchen Grundlage wären niedrig (5- bis niedriger 6-stelliger Kostenbereich). Allenfalls fehlen derzeit noch gewisse Erfahrungswerte (z.B. tatsächlicher Energieverbrauch) aus dem Einsatz elektrischer Maschinen

¹⁸ <https://urbanaccessregulations.eu/news-and-press/1152-geneva-and-stick-air> (Zugriff am 7.6.2024)

¹⁹ <https://www.ge.ch/pics-pollution-stick-air-circulation-differenciee/questions-particulieres> (Zugriff am 7.6.2024)

2 - Energieversorgung

Unterstützung bei Beantragung Stromversorgung

- Betriebe, die eine Stromversorgung für elektrische Non-Road-Maschinen beim lokalen Energieversorger beantragen (z.B. für eine Baustelle), werden mit Know-how unterstützt, z.B. von einer Fachstelle.

Wirkung mittel, Umsetzbarkeit hoch

- Wirkung: Die Massnahme kann eine oft erwähnte Hürde für den Einsatz elektrischer Maschinen deutlich senken.
- Umsetzbarkeit: Die Akzeptanz einer solchen Massnahme wird hoch eingeschätzt. Die Kosten wären vermutlich niedrig, wenn die Aufgabe von einer Fachstelle (oder einem Auftragnehmer) erledigt wird, wo das Knowhow sowieso vorhanden ist.

3 – Betrieb

Unterstützung «Change Management»

- Anwender:innen werden bei der Anpassung der Prozesse im Betrieb während/nach der Elektrifizierung ihres Maschinenparks beraten.
- Beispiel: [PEIK²⁰](#)-Energieberatung für KMU für Effizienzmassnahmen

Wirkung hoch, Umsetzbarkeit mittel bis hoch

- Wirkung: Die Massnahme reduziert die Unsicherheit und den Aufwand für die Erlangung des notwendigen Know-How bei der Umstellung auf elektrische Maschinen.
- Umsetzbarkeit: Hinsichtlich Akzeptanz dürften Bedenken hinsichtlich Aufgabe des Staates, Fairness gegenüber anderen Branchen, und Kosten eingebracht werden. Es sind aber Modelle denkbar, die solchen Bedenken entgegenkommen (z.B. Teilfinanzierung/Gutscheinsystem, branchenunabhängige Ausgestaltung)

Aus-/Weiterbildungen von Fachpersonal für Wartungsarbeiten

- Der gesicherte Zugang zu Werkstätten mit Fachpersonal für Wartungsarbeiten ist Teil der kritischen Infrastruktur.
- Die Wartung der elektrischen Maschinen erfordert eine Spezialausbildung, für das Personal geschult werden muss.

Wirkung hoch, Umsetzbarkeit mittel

- Wirkung: Fachpersonal ist essenziell bei der Umsetzung der Elektrifizierung – die Massnahme setzt daher an einer wichtigen Stelle an, und Multiplikatoreffekte sind denkbar.
- Umsetzbarkeit wird deswegen nur mittel eingestuft, weil in diesem Markt Fachkräftemangel herrscht und Mechaniker:innen mit der nötigen Spezialausbildung oft nicht langfristig in dieser Position bleiben.

Vernetzungsveranstaltungen

- Der Kanton organisiert oder fördert Veranstaltungen zum Erfahrungsaustausch.

Wirkung tief bis mittel, Umsetzbarkeit hoch

- Wirkung: Die Massnahme fördert die Verbreitung von Knowhow und kann helfen, Vorbehalte gegenüber der Elektrifizierung abzubauen. Es kann allerdings auch sein, dass sich Teilnehmende gegenseitig darin bestärken, gewisse Prozesse nicht zu elektrifizieren.
- Umsetzbarkeit: Aufgrund geringer zu erwartender Kosten dürfte die politische Akzeptanz hoch sein.

²⁰ <https://peik.ch/> (Zugriff am 7.6.2024)

Kommunikationsplattform für Pilotprojekte

- Eine digitale Plattform wird erstellt, auf der Erfahrungsberichte zu Pilotprojekten geteilt werden.
- Inspiration möglich vom «[Clean Construction Forum](#)»²¹ der C40 Cities, das Städte beim Übergang zu ressourceneffizientem, emissionsfreiem Bauen unterstützt, geleitet von der Stadt Oslo.

Wirkung mittel, Umsetzbarkeit hoch

- Wirkung: Die Massnahme fördert die Verbreitung von Knowhow und kann helfen, Vorbehalte gegenüber der Elektrifizierung abzubauen.
- Umsetzbarkeit: Aufgrund eher geringer zu erwartender Kosten dürfte die politische Akzeptanz hoch sein.

3.4.5. Handlungsfeld «Vorbild Kanton»

Die kantonale Flotte an Non-Road-Maschinen soll bis 2040 CO₂-emissionsfrei betrieben werden. Dafür dürfen ab 2030 nur noch Maschinen neu beschafft werden, die im Betrieb keine CO₂-Emissionen verursachen ([Regierungsratsbeschluss Nr. 949/2021 des Kantons Zürich](#)²²). Mit dieser Weisung nimmt der Kanton eine Vorbildfunktion bei der Dekarbonisierung ein.

Da die kantonale Flotte von Non-Road-Maschinen auf einige hundert Fahrzeuge beschränkt ist und damit nur einen kleinen Teil der insgesamt rund 40'000 Non-Road-Maschinen im Kanton darstellt, ist die **direkte Wirkung** von Massnahmen, die den kantonalen Fahrzeug-/Maschinenpark betreffen, **mengenmässig beschränkt**. Die **indirekte Wirkung** ist schwer quantifizierbar – aber die Bereitschaft des privaten Sektors für eine Umstellung auf alternative Antriebe steigt mutmasslich, wenn der **Kanton als Vorbild** die Machbarkeit der Elektrifizierung aufzeigt; und umgekehrt würde es negativ wahrgenommen, wenn der Kanton die Umstellung zwar von der Privatwirtschaft forderte, aber selbst nicht voranschreitet. Zudem können in Pilotprojekten sowie mit auf dem Markt eingekauften Maschinen Erfahrungswerte für den Betrieb der Maschinen unter realen Bedingungen (z.B. zu Ladezeit und Einsatzdauer) gesammelt und weiteren Anwender:innen zur Verfügung gestellt werden. Für kleinere Hersteller oder Spezialmaschinen kann die Beschaffung einer gewissen Stückzahl durch den Kanton sogar die kommerzielle Entwicklung beschleunigen.

²¹ <https://www.c40.org/de/what-we-do/scaling-up-climate-action/energy-and-buildings/clean-construction-forum/> (Zugriff am 10.6.2024)

²² <https://www.zh.ch/de/politik-staat/gesetze-beschluesse/beschluesse-des-regierungsrates/rrb/regierungsratsbeschluss-949-2021.html> (Zugriff am 7.6.2024)

Tabelle 10: Vorschläge für Fördermassnahmen im Handlungsfeld «Vorbild Kanton» und ihre Bewertung.

Massnahme/Anreiz	Bewertung
1 – Anschaffung	
Umstellung der kantonalen Flotte/des kantonalen Maschinenparks <ul style="list-style-type: none"> Substitution der konventionell angetriebenen Fahrzeuge/Maschinen im Besitz des Kantons mit elektrischen Alternativen 	Wirkung mittel, Umsetzbarkeit variabel <ul style="list-style-type: none"> Wirkung: S. einleitenden Text dieses Kapitels Umsetzbarkeit: Abhängig von Grösse bzw. Energiebedarf der Maschinen – je höher der Energiespeicherbedarf, desto schwieriger
Priorisierung der Beschaffung festlegen <ul style="list-style-type: none"> Da die Umstellung der gesamten Flotte kostenintensiv ist, könnte eine Priorisierung der Beschaffung abhängig von der Klimaschutzwirkung der Umstellung erstellt werden – z.B. basierend auf Energiebedarf oder CO₂-Emissionsfaktoren im Betrieb, der Energieherstellung und dem zeitlichen Verlauf der möglichen Alternativen. 	Wirkung mittel, Umsetzbarkeit hoch <ul style="list-style-type: none"> Wirkung: S. einleitenden Text dieses Kapitels Umsetzbarkeit: Kein Hindernis
2 – Energieversorgung	
Kantonaler Betrieb von Produktionsanlagen Bio-/synthet. Treibstoffe <ul style="list-style-type: none"> Mit dem Betrieb einer Herstellungsanlage durch den Kanton wird die Verfügbarkeit der alternativen Treibstoffe erhöht. 	Wirkung mittel, Umsetzbarkeit tief <ul style="list-style-type: none"> Wirkung: Abhängig erstmals von der Produktionskapazität der Anlage – je mehr Treibstoff produziert wird, desto mehr fossile Treibstoffe können substituiert werden. Allerdings – wie bei allen Fördermassnahmen für low carbon fuels – wird damit die Elektrifizierung mit ihren Zusatzvorteilen nicht gefördert, sondern potenziell gebremst Umsetzbarkeit: Die politische Akzeptanz wird gering eingeschätzt (Argumente bspw.: nicht Kantonsaufgabe, Konkurrenz zur Privatwirtschaft, Kanton hat fachliche Kompetenz nicht, etc.); ökonomische Umsetzbarkeit ist fraglich
3 – Betrieb	
Umsetzung/Unterstützung von Pilotprojekten <ul style="list-style-type: none"> Kanton unterstützt Pilotprojekte finanziell, oder beschafft Prototypen selbst und testet sie im Einsatz – bspw. alternativ angetriebene Traktoren im Strickhof, oder Baumaschinen auf kantonalen Baustellen. Die Massnahme kann auch Testangebote mit Ausleihe für interessierte Nutzer:innen beinhalten Beispiel Norwegen²³: Unterstützung von 10 Pilotprojekten, die Lösungen für emissionsfreie Baustellen testen (u.a. Projekte zur Umrüstung von konventionellen Maschinen, Wissensprogramm zum Austausch von «Best Practices», Entwicklung mobiler Ladestationen). 	Wirkung mittel, Umsetzbarkeit variabel <ul style="list-style-type: none"> Wirkung: Der Kanton trägt das Risiko (mit), dass Prototypen fehleranfälliger als Serienprodukte sind. Der Support der Hersteller über die Lebensdauer der Maschine ist nicht gesichert. Bevorzugt wird, wenn Maschinen nur zum Testen von den Herstellern geliehen werden können. Umsetzbarkeit ist abhängig vom Projekt

Maschinen-Ausleihe zum Test

- Der Kanton beschafft Maschinen und vermietet sie leihweise interessierten Nutzer:innen
- Beispiel: [Stadt Ostfold, Norwegen²⁴](#) testet Leihangebote für Baumaschinen

Wirkung mittel, Umsetzbarkeit mittel

- Massnahme kann mengenmässig keine grosse Anzahl Maschinen beinhalten – aber hilft, Vorbehalte gegenüber elektrischen Maschinen abzubauen und Erfahrungen zu sammeln.
- Umsetzbarkeit: Müsste abgeklärt werden; erfordert Expertise/Fachpersonal seitens Kanton. Massnahme wird in Norwegen bereits umgesetzt.

3.4.6. Empfehlungen und übergeordnete Aspekte

Um eine effektive Förderung der Dekarbonisierung der Non-Road-Maschinen im Kanton Zürich zu erreichen, werden sowohl von den Workshop-Teilnehmenden wie auch von INFRAS mehrere Stossrichtungen als zentral bewertet. Diese können mit mehreren Massnahmen und Anreizen verteilt auf mehrere Handlungsfelder ausgestaltet werden können:

- **Der Kanton kann den Ausbau der Ladeinfrastruktur finanziell fördern** (z.B. mittels finanzieller und Know-How-Unterstützung von Grundinstallationen und Schnell-Ladestationen, aber auch mittels Ausbildung von Fachpersonal). Gerade die Förderung von Grundinstallationen (d.h. Zuleitungen, ggf. Trafos) verspricht Multiplikator-Effekte: Die Kosten für die Grundinstallation können anfangs typischerweise erst auf wenige Maschinen aufgeteilt werden – ist sie jedoch vorhanden, können leicht Ladestationen für zusätzliche Maschinen hinzuinstituiert werden.
- **Der Kanton kann Beratungs- und Ausbildungsangebote entwickeln oder finanziell fördern**, die Nutzer:innen aktiv beim Umstellungsprozess ihrer Maschinenflotte auf alternative Antriebstechnologien unterstützen. Beratungsangebote sollten alle Nutzungsphasen der Maschinen umfassen («Change management»). Gleichzeitig nimmt **der Kanton mit der Aufgabe, die eigene Flotte umzustellen, eine Vorbildfunktion ein**, um die Machbarkeit der Elektrifizierung aufzuzeigen und Erfahrungswerte aus dem Betrieb der Maschinen sammeln. Ohne Unterstützung und Zugang zu Erfahrungswerten bleiben viele Nutzer:innen zögerlich, eine Umstellung zu wagen. Dies gilt auch dann, wenn marktseitig Angebote für elektrische Maschinen vorhanden wären.
- **Umweltaspekte können als obligatorisches Vergabekriterium in Submissionsverfahren für Bauprojekte aufgenommen werden.** Zusätzlich könnten konkrete Anforderungen an die Emissionsgrenzwerte der einzusetzenden Maschinen gestellt werden. Diese Massnahme erhöht den Druck auf Bauunternehmen ihre Fahrzeugflotten umzustellen, um konkurrenzfähig zu bleiben.

²³ <https://www.regjeringen.no/no/aktuelt/10-nye-prosjekter-skal-teste-ut-losninger-for-utslippsfrie-anleggsplasser/id2968357/> (Zugriff am 7.6.2024)

²⁴ <https://klimaostfold.no/tiltaksomrader/fossilfrie-arbeidsmaskiner-og-kjoretoy/> (Zugriff am 7.6.2024)

In der Diskussion zu diesen Ansätzen am Workshop ergaben sich übergeordnet folgende Aspekte, die bei der Entwicklung von Fördermassnahmen miteinbezogen werden sollten:

- Innerhalb des Non-Road-Maschinensektors bestehen zwischen verschiedenen Akteuren **wechselseitige Abhängigkeiten («Henne-Ei-Prinzip»²⁵)**. Diese führen zu einer Abwartehaltung der Akteure und verzögern so den Fortschritt bei der Elektrifizierung. Massnahmen, die diese Abwartehaltung durchbrechen, können mit geringem Aufwand hohe Wirkung erzielen.
- Der Non-Road-Maschinensektor ist sehr heterogen. **Daher unterscheidet sich die Umsetzbarkeit einiger Massnahmen teilweise deutlich zwischen den Maschinengattungen sowie Leistungsklassen** derselben Maschinenkategorie.
 - 1. Beispiel: Die Umsetzbarkeit der Massnahme «Umstellung der kantonalen Flotte» variiert stark in Abhängigkeit von der Maschinengattung. Die Umsetzbarkeit für kantonale Forstmaschinen und Maschinen mit speziellen Anforderungen an ihren Einsatz (z.B. 24-Stunden-Winterdienst) wird als sehr niedrig bewertet. Die elektrischen Alternativen sind nicht leistungsstark genug oder die Ladeinfrastruktur kann nicht gewährleistet werden. Eine hohe Umsetzbarkeit wurde hingegen z.B. für landwirtschaftliche Maschinen, die am Hof eingesetzt werden, sowie Kehr- und Reinigungsmaschinen festgestellt.
 - 2. Beispiel: Marktseitig gibt es genügend Angebote für elektrifizierte Maschinen kleinerer Leistungsklasse (etwa bis 75 kW), bei denen vor allem die Marktdurchdringung gefördert werden sollte. Für leistungsstärkere Maschinen bestehen weiterhin technische Limitierungen bei der Elektrifizierung. Für diese Maschinen sollte eher die Entwicklung weiterer alternativer Technologien gefördert werden.
- Die Wichtigkeit der Verfügbarkeit von ausgebildetem **Fachpersonal** wird immer wieder betont. Umgekehrt herrscht die Befürchtung, dass nicht genügend Personal gefunden und gehalten werden kann.
- Die Unterstützung von **Bio- und synthetischen Treibstoffen** (z.B. HVO oder «hydrogenated vegetable oil») wird eher kritisch bewertet. Diese könnten zwar möglicherweise kurzfristig eine hohe CO₂-Emissionsreduktion erzielen, da die Treibstoffe in herkömmlichen Maschinen verwendet werden können (s. auch ERM 2023). Es werden jedoch die folgenden Nachteile betont:
 - Zusätzliche Vorteile der Elektrifizierung (wie z.B. Lärm- und Luftschadstoffreduktion) fallen weg.

²⁵ Beispiele:

- Bauherren investieren nicht in die Umstellung ihrer Fahrzeugflotte auf alternative Antriebstechnologien, da die Projektausschreibungen dies nicht einfordern – umgekehrt fordern Auftraggebende keine Umstellung ein, da nach ihrer Wahrnehmung das Angebot nicht existiert.
- Nutzer:innen von Non-Road-Maschinen zögern, ihre Flotte zu elektrifizieren, solange die Infrastruktur für Ladung und Wartung nicht gewährleistet ist. Andererseits schreitet gemäss Marktgesetzen der Ausbau der Infrastruktur erst dann voran, wenn die Nachfrage durch die Nutzer:innen gegeben ist.

- Bio- und synthetische Treibstoffe sind ohne Subventionen nicht kompetitiv. Sie zu subventionieren, verursacht v.a. laufende Kosten. Die entsprechenden Mittel fehlen bei der Unterstützung nachhaltigerer Fördermassnahmen oder solcher mit einem Multiplikatoreffekt.
- Eine Förderung Unterstützung von Bio- und synthetischen Treibstoffen könnte sogar Elektrifizierungsanstrengungen verlangsamen oder unterlaufen.
- Biotreibstoffe sind nicht in genügenden Mengen verfügbar, um den ganzen Dieserverbrauch zu ersetzen. Es sollte daher v.a. dort eingesetzt werden, wo keine anderen Dekarbonisierungsoptionen bestehen.
- **Norwegen**, insbesondere die Stadt Oslo und für die Gattung der Baumaschinen, nimmt eine **Vorbildfunktion bei der Dekarbonisierung** von Non-Road-Maschinen ein (siehe Beispiele der Tabelle 7-Tabelle 10). Aus den Erfahrungen Norwegens können wertvolle Hinweise für die konkrete Ausgestaltung einzelner Fördermassnahmen im Kanton Zürich abgeleitet werden.
- **Bidirektionales Laden** bietet Chancen, Vorteile für die Elektrifizierung des Non-Road-Maschinensektors zu erschliessen. Kann Strom aus der Fahrzeugbatterie zurück ins Stromnetz eingespeist werden (Vehicle-to-Grid) oder andere Geräte versorgen (Vehicle-to-Load), verbessert sich die Flexibilität im Einsatz der elektrifizierten Maschinen. Zum jetzigen Stand sind die nötigen Systeme kommerziell noch nicht breit verfügbar.

Annex

A1. Marktanalyse: Befragung

Tabelle 11: Teilnehmende an der Befragung für die Marktanalyse in AP 1

	Maschinengattung	Rolle	Name	Firma	schriftliche/telefonische Teilnahme?
1	Baumaschinen	Anwender	Luca Burkart	Implenia AG	schriftlich
2	Baumaschinen	Anwender	Marco Cellere	Cellere Bau AG	schriftlich
3	Baumaschinen	Anwender	Mario Erdin	Erne AG	schriftlich
4	Baumaschinen	Vertriebspartner	Martin Herrmann	Robert Aebi AG Bautechnik	schriftlich
5	Baumaschinen	Anwender	Martin Laager	KIBAG AG	telefonisch
6	Baumaschinen	Anwender	Oliver Föhn	Walo Bertschinger AG	schriftlich
7	Baumaschinen	Vertriebspartner	Thomas Wermelinger	Avesco CH	schriftlich
8	Baumaschinen	Anwender	Urs Gachnang	Scheifele AG	schriftlich
9	Forstwirtschaft	Anwender	Daniel Böhi	Forstamt Thurgau	schriftlich
10	Forstwirtschaft	Anwender	Tobias Wiss	WISS AG	schriftlich
11	Forstwirtschaft	Anwender	Urban Brütisch	Kantonsforstamt Schaffhausen	schriftlich
12	Industrie	Hersteller, Vertriebspartner	Benedikt Sturny	Boschung AG	schriftlich
13	Industrie	Anwender	Bruno Fitze	Flughafen Zürich AG	schriftlich
14	Industrie	Hersteller, Vertriebspartner	Igor Grcic	Bucher Municipal AG	telefonisch
15	Landwirtschaft	Anwender	Bernhard Koch	Grün Stadt Zürich	schriftlich/telefonisch
16	Landwirtschaft	Vertriebspartner, Experte	Hansjörg Furter	Landwirtschaftliches Zentrum LIEBEGG	schriftlich
17	Landwirtschaft	Hersteller, Vertriebspartner, Anwender	Marco Brunner	Bucher Landtechnik AG	schriftlich
18	Landwirtschaft	Vertriebspartner	Michael Kern	GVS Agrar	schriftlich
19	Landwirtschaft	Vertriebspartner	Michael Bielser, Urs Baumann	Robert Aebi AG Landtechnik	telefonisch
20	Landwirtschaft	Experte	Paul Müri	SSES Aargau	telefonisch
21	Landwirtschaft	Anwender	Ramon Winterberg	Erushof	telefonisch
22	Sektorübergreifend	Berater für Anwender	Jeannot Wagner	Tiefbauamt Kt ZH, Fzg-Beschaffung	schriftlich
23	Sektorübergreifend	Experte	Konstantin Weller	TU Graz	telefonisch

Abbildung 22: Blatt 0 der Befragung für AP 1.

0 Allgemeine Informationen zur Befragung - Marktstudie und Potenzialabschätzung "Elektrifizierte Non-Road-Maschinen"	
<p>Vielen Dank, dass Sie sich zur Teilnahme an der Befragung bereit erklärt haben!</p>	
<p>Studienkontext: Als Teil des Massnahmenplans "Klima" von 2018 entwickelt der Kanton Zürich Fördermassnahmen zur Elektrifizierung von Non-Road Maschinen im Industrie-, Bau-, Forst-, und Landwirtschaftsgewerbe. Dazu wurde INFRAS vom Zürcher Kantonsamt AWEL beauftragt, eine Marktanalyse durchzuführen. Weitere Details zur Studie können Sie dem AWEL Begleitschreiben und unserer E-Mail-Kommunikation entnehmen.</p>	  <p>Kanton Zürich</p>
<p>Die Befragung ist auf sieben Blätter aufgeteilt, die sich auf folgende Themen beziehen:</p> <p>1 Betrieb - allgem. Infos: Kontaktdaten zu Ihrem Betrieb</p> <p>2 Betrieb - Maschinentypen: Auswahl der Maschinentypen, zu denen Sie Auskunft geben können</p> <p>3 Stand heute: Aktuelle Verfügbarkeit von (teil-)elektrischen Antrieben für Ihre ausgewählten Maschinentypen</p> <p>4 Vorteile: Gründe für eine Elektrifizierung Ihrer ausgewählten Maschinentypen</p> <p>5 Nachteile: Gründe gegen eine Elektrifizierung Ihrer ausgewählten Maschinentypen</p> <p>6 Zusatzfragen: Zusatzfragen zur Anwendung Ihrer Maschinentypen und zur Umsetzung der Elektrifizierung</p> <p>7 Gesamtpotenzial bis 2030: Gesamteinschätzung des Potenzials alternativer Antriebe für Ihre ausgewählten Maschinentypen</p>	  <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> <p>DENKEN ÜBER MORGEN</p> </div>
<p>Wichtige Hinweise, bevor Sie starten:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Bitte schreiben Sie nur in Zellen mit weissem Hintergrund und gepunktetem Rahmen. Für jede Frage gibt es auch ein Kommentarfeld. - Die Befragung sollte der Reihe nach ausgefüllt werden. Insbesondere Zeileninhalte vom Blatt "2 Betrieb - Maschinentypen" sind nötig für Fragen der Blätter 3 bis 7. - Das Navigieren zwischen verschiedenen Blättern der Befragung ist aber jederzeit möglich. - Wir erwarten nicht, dass Sie für jeden Maschinentyp zu allen Fragen Auskünfte geben können. Es ist kein Problem die Zelle leer zu lassen, wenn die Frage Sie nicht betrifft oder Sie aus einem anderen Grund keine Auskunft geben können. - Wenn Auskünfte mit Zahlenwerten gefragt sind, genügen auch Schätzwerte. 	
<p>Kontakt für Rückfragen:</p> <p>Sophie Bogler +41 44 205 95 29 sophie.bogler@infras.ch</p> <p>Dr. Benedikt Notter +41 31 370 19 14 benedikt.notter@infras.ch</p>	

Grafik INFRAS. Quelle: Screenshot Excel Fragebogen.

Abbildung 23: Blatt 1 der Befragung für AP 1.

1 Informationen zu Ihrem Betrieb und Kontaktdaten

Name Betrieb		
Rolle im Non-Road Maschinen Sektor	Bitte aus Liste auswählen oder eigenen Eintrag verfassen	
Verband	Falls zutreffend, z.B. Verband der Schweizerischen Baumaschinenwirtschaft	
Name, Vorname		
Telefonnummer	Bitte im Format +44 xx xxx xxx	
E-Mail-Adresse		
Anschlussgespräch	Wären Sie bereit für ein telefonisches Anschlussgespräch für vertiefende Rückfragen zu Ihren Auskünften?	
Kommentarfeld		

Grafik INFRAS. Quelle: Screenshot Excel Fragebogen.

Abbildung 24: Blatt 2 der Befragung für AP 1.

2 Auswahl Maschinentypen

Bitte wählen Sie in diesem Blatt aus, zu welchen Maschinentypen Sie Auskunft geben können.
Ihre hier erstellte Liste wird für die Folgeblätter übernommen.

Sie haben die Möglichkeit, für mehrere Maschinentypen übergreifend in einer Zeile Auskunft zu geben, oder für jeden Maschinentyp einzeln eine Zeile zu befüllen.
Bitte differenzieren Sie die Zeilen hinsichtlich der Faktoren, nach denen sich Ihrer Meinung nach das Elektrifizierungspotential unterscheidet!
D.h. wenn das Elektrifizierungspotential desselben Maschinentyps zum Beispiel abhängig vom Einsatzort oder der Leistungsklasse variiert, können Sie mehrere Zeilen für diesen Maschinentyp füllen.
Sie können zwischen einer und 30 Zeilen ausfüllen.
Für die Angabe der Maschinentypen und Einsatzorte haben wir Vorschläge in einer Liste erstellt, Sie können aber auch weitere Maschinentypen oder Einsatzorte direkt eintragen.

Sektor	Maschinentyp	Leistungsklasse	Antriebsart heute	Einsatzort	Kommentarfeld
Bitte wählen Sie aus der Liste aus, in welchem Sektor die Maschine eingesetzt wird.	Bitte wählen Sie den Maschinentyp aus der Liste aus oder verfassen Sie einen eigenen Eintrag.	Bitte wählen Sie die Motor- oder elektrische Nennleistung aus der Liste aus.	Was ist die häufigste heutige Antriebsart der Maschine? Bitte wählen Sie aus der Liste aus.	Wo wird die Maschine eingesetzt? Bitte wählen Sie aus der Liste aus oder verfassen Sie einen eigenen Eintrag.	

Grafik INFRAS. Quelle: Screenshot Excel Fragebogen.

Abbildung 26: Blatt 4 der Befragung für AP 1.

4 Gründe für eine Elektrifizierung				
In diesem Blatt können Sie Auskunft darüber geben, welche Gründe für eine Elektrifizierung der Maschinentypen sprechen. Sie können unsere Vorauswahl für Gründe nutzen und diese nach ihrer Wichtigkeit ordnen oder eigene Vorteile ergänzen.				
- Übernommen vom Blatt "Betrieb - Maschinentypen" -				
Maschinentyp	Leistungsklasse	Einsatzort	Vorteile	Kommentarfeld
			Bitte geben Sie die fünf wichtigsten Vorteile einer Elektrifizierung an, geordnet nach ihrer Wichtigkeit. Sie können die Vorauswahl aus der Liste nutzen oder einen eigenen Eintrag verfassen.	
			1	
			2	
			3	
			4	
			5	
			1	

Grafik INFRAS. Quelle: Screenshot Excel Fragebogen.

Abbildung 27: Blatt 5 der Befragung für AP 1.

5 Gründe gegen eine Elektrifizierung				
In diesem Blatt können Sie Auskunft darüber geben, welche Gründe gegen eine Elektrifizierung der Maschinentypen sprechen. Sie können unsere Vorauswahl für Gründe nutzen und diese nach ihrer Wichtigkeit ordnen oder eigene Nachteile ergänzen.				
- Übernommen vom Blatt "Betrieb - Maschinentypen" -				
Maschinentyp	Leistungsklasse	Einsatzort	Nachteile	Kommentarfeld
			Bitte geben Sie die fünf wichtigsten Nachteile einer Elektrifizierung an, geordnet nach ihrer Wichtigkeit. Sie können die Vorauswahl aus der Liste nutzen oder einen eigenen Eintrag verfassen.	
			1	
			2	
			3	
			4	
			5	

Grafik INFRAS. Quelle: Screenshot Excel Fragebogen

Abbildung 28: Blatt 6 der Befragung für AP 1.

6 Zusatzfragen zur Anwendung						
Bitte geben Sie in diesem Blatt an, unter welchen Bedingungen Ihre Maschinen im regulären Betrieb eingesetzt werden, und was für Möglichkeiten bestehen, eine Elektrifizierung umzusetzen.						
- Übernommen vom Blatt "Betrieb - Maschinentypen" -						
Maschinentyp	Leistungsklasse	Einsatzort	Betriebsdauer		Lastfaktor	
			Wieviele Stunden am Stück wird die Maschine im regulären Betrieb durchschnittlich eingesetzt? Bitte geben Sie eine Zahl oder einen Zahlenbereich in Stunden an (z.B. 3, 6-10).	Wieviele Stunden pro Jahr wird die Maschine durchschnittlich eingesetzt? Bitte geben Sie eine Zahl oder einen Zahlenbereich in Stunden an.	Wie hoch ist im regulären Betrieb der Lastfaktor der Motor-Leistung ? z.B. 100% bei voller Auslastung	Ist die Motor-Auslastung der Maschine im regulären Betrieb eher konstant oder sehr dynamisch ?
Umsetzung der Elektrifizierung						Kommentarfeld
Existiert die Möglichkeit zum Nachladen während des regulären Betriebs (z.B. in Pausen)?	Ist der Unterhalt und die Mitnahme von Reserveakkus eine Option?	Gibt es die Möglichkeit für Kabelbetrieb ?	Falls bekannt/schätzbar, was wären die Kosten in CHF eines Batteriesystems als Ersatz des aktuellen Motors (Stand heute)	Was ist eine typische Tankgröße (in L), die ersetzt werden müsste? Bitte geben Sie eine Zahl oder einen Zahlenbereich in Litern an.		

Grafik INFRAS. Quelle: Screenshot Excel Fragebogen

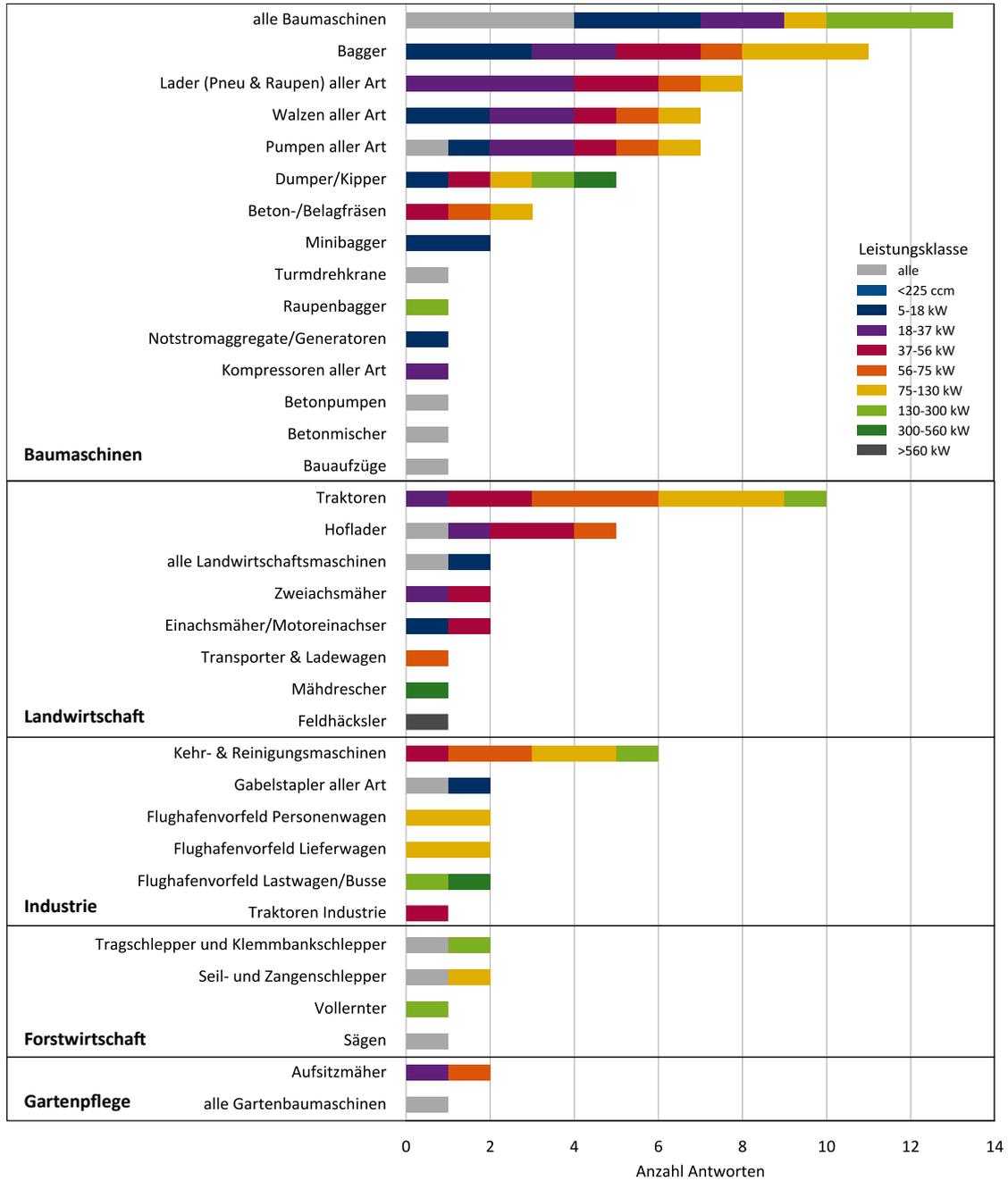
Abbildung 29: Blatt 7 der Befragung für AP 1.

7 Gesamtpotenzial für Elektrifizierung bis 2030				
<p>In diesem Blatt geht es um die Entwicklung der (teil-)elektrische Antriebstechnologien Ihrer Maschinentypen bis ins Jahr 2030. Sie können zunächst auswählen, welche (teil-)elektrischen Antriebstechnologien Ihrer Einschätzung künftig das grösste Potenzial haben und anschliessend dieses Potenzial mittels einer Skala bewerten. Falls Ihrer Meinung nach zutreffend, könnten verschiedene (teil-)elektrische Antriebstechnologien mit dem gleichen Potenzial bewertet werden.</p>				
- Übernommen vom Blatt "Betrieb - Maschinentypen" -				
Maschinentyp	Leistungsklasse	Einsatzort	Technologie	Potenzial
			<p>Welche (teil-)elektrischen Antriebstechnologien haben das grösste Potenzial für diesen Maschinentyp (Zeitraum bis 2030)?</p> <p>Ordnen Sie bitte die Technologien aus der Liste nach ihrer Wichtigkeit.</p>	<p>Wie hoch stufen Sie das Potenzial dieser (teil-)elektrischen Antriebstechnologien bis 2030 ein?</p> <p>(Skala von 0-5, 0 - kein Potenzial, 5 - sehr hohes Potenzial)</p>
			1	
			2	

Weitere Antriebe	Fördermassnahmen	Kommentarfeld
Falls zutreffend, listen Sie bitte weitere alternative Antriebstechnologien , die Ihnen für diesen Maschinentyp bekannt sind.	Mit welchen Fördermassnahmen könnten bestehende Herausforderungen für die Elektrifizierung dieses Maschinentyps überwunden werden?	

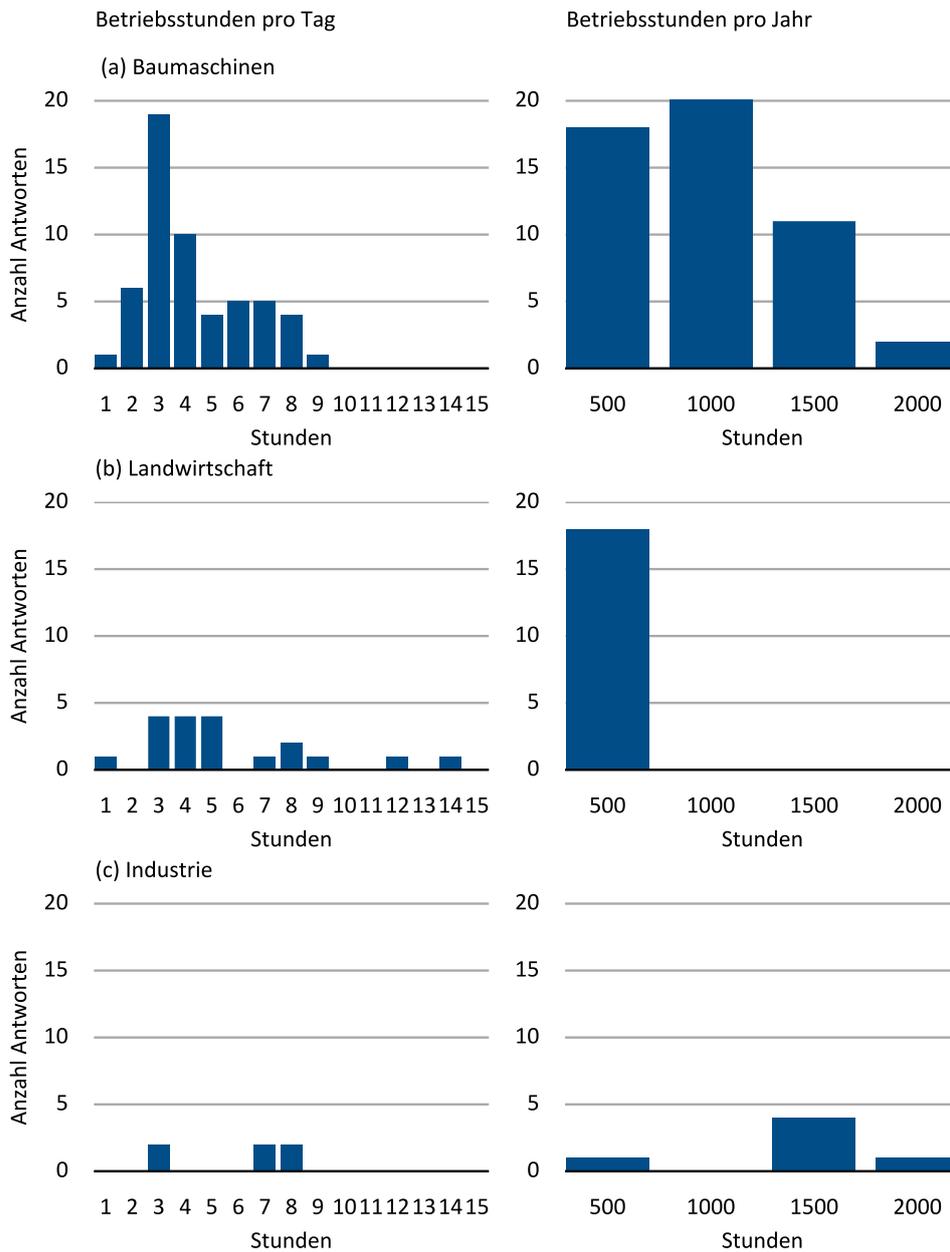
Grafik INFRAS. Quelle: Screenshot Excel Fragebogen

Abbildung 30: Anzahl Antworten pro Maschinengattung und Maschinenkategorie.



Grafik INFRAS. Quelle: Befragung AP 1.

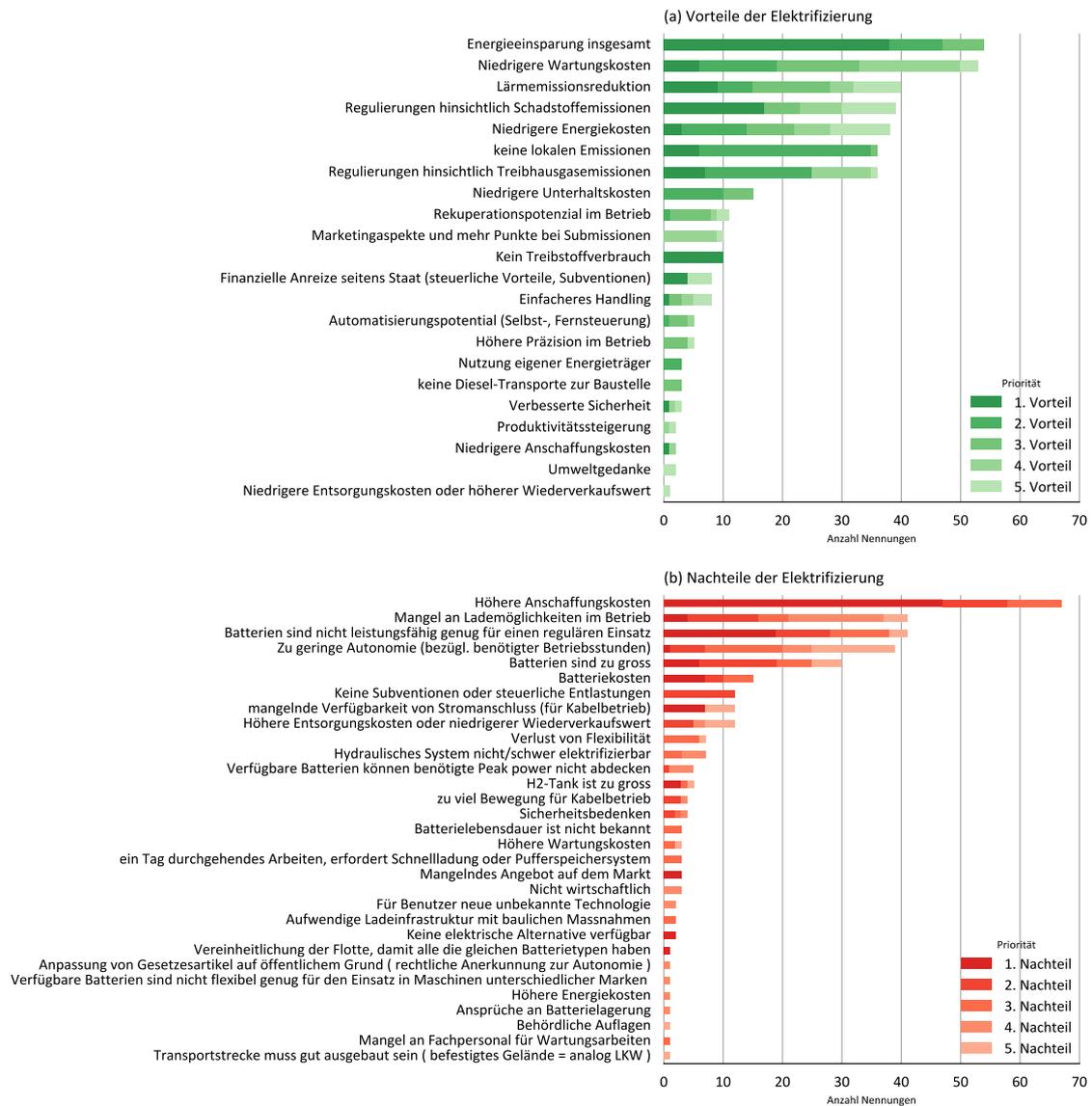
Abbildung 31: Angaben zu Betriebsstunden pro Tag (linke Spalte) und pro Jahr (rechte Spalte) für Non-Road-Maschinen aus den Gattungen (a) Baumaschinen, (b) Landwirtschaft und (c) Industrie.



Hinweis: Die Anzahl Antworten zu diesen Fragen für die Maschinengattungen Forstwirtschaft und Gartenpflege war so gering, dass auf eine detaillierte Auswertung verzichtet wurde.

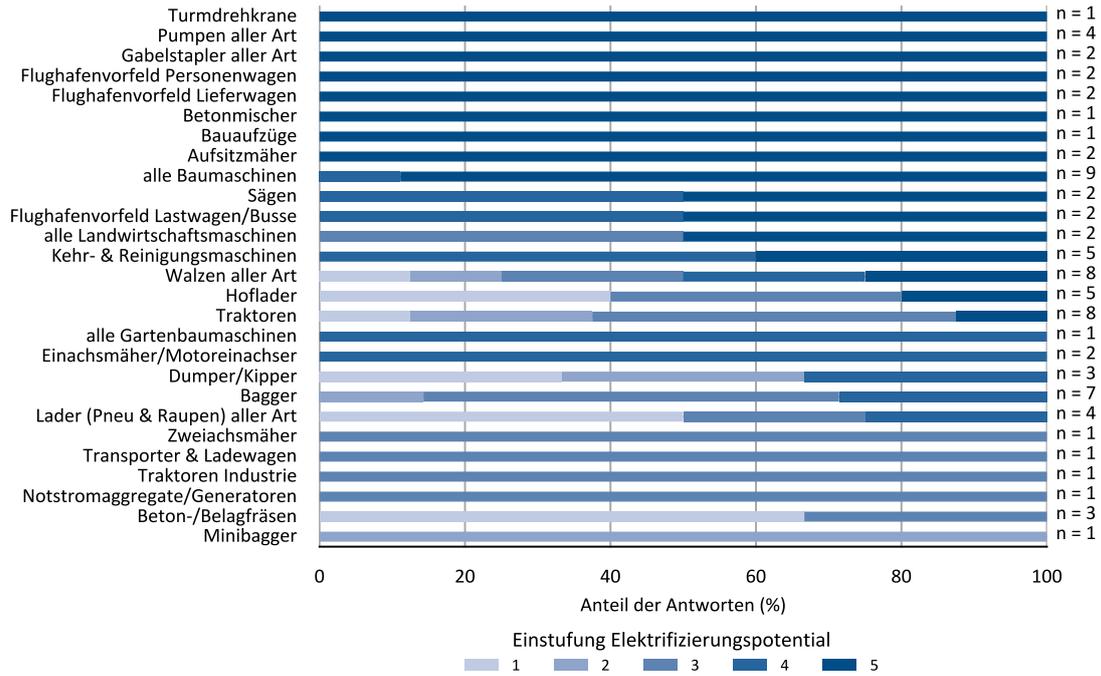
Grafik INFRAS. Quelle: Befragung AP 1.

Abbildung 32: Verteilung der Antworten zu (a) Vorteilen und (b) Nachteilen der Elektrifizierung



Grafik INFRAS. Quelle: Befragung AP 1.

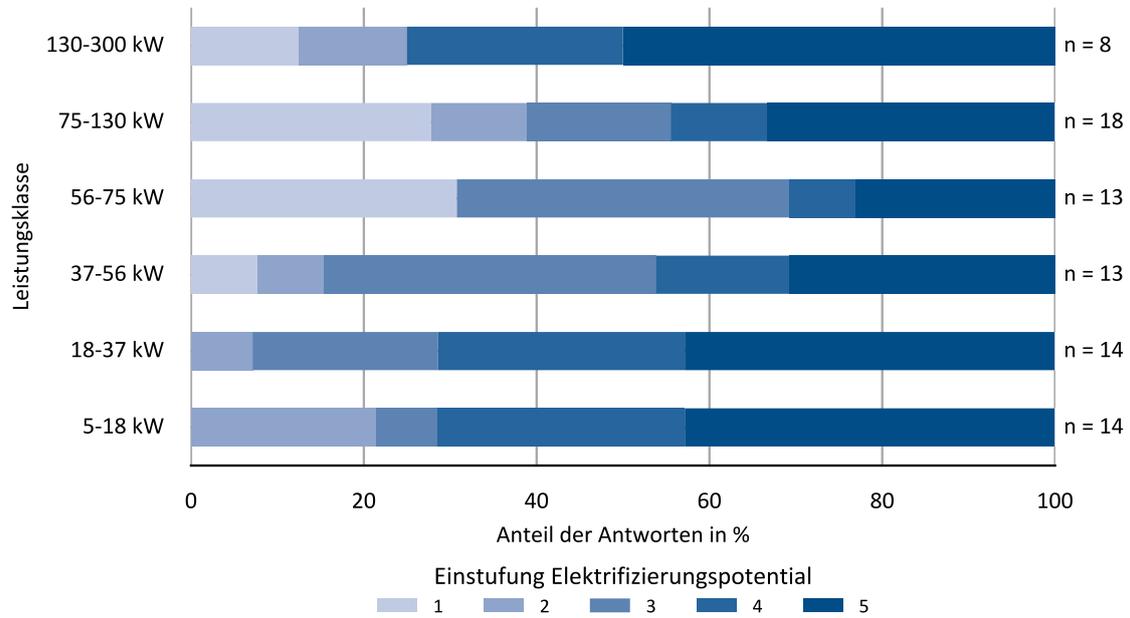
Abbildung 33: Einstufung des Elektrifizierungspotentials bis 2030 für batterieelektrische Non-Road-Maschinen nach Maschinenkategorie. Skala von 1 bis 5 mit 5 als Höchstwert für das Elektrifizierungspotential.



Hinweis: n ist die Gesamtanzahl erhaltener Antworten für diese Maschinenkategorie.

Grafik INFRAS. Quelle: Befragung AP 1.

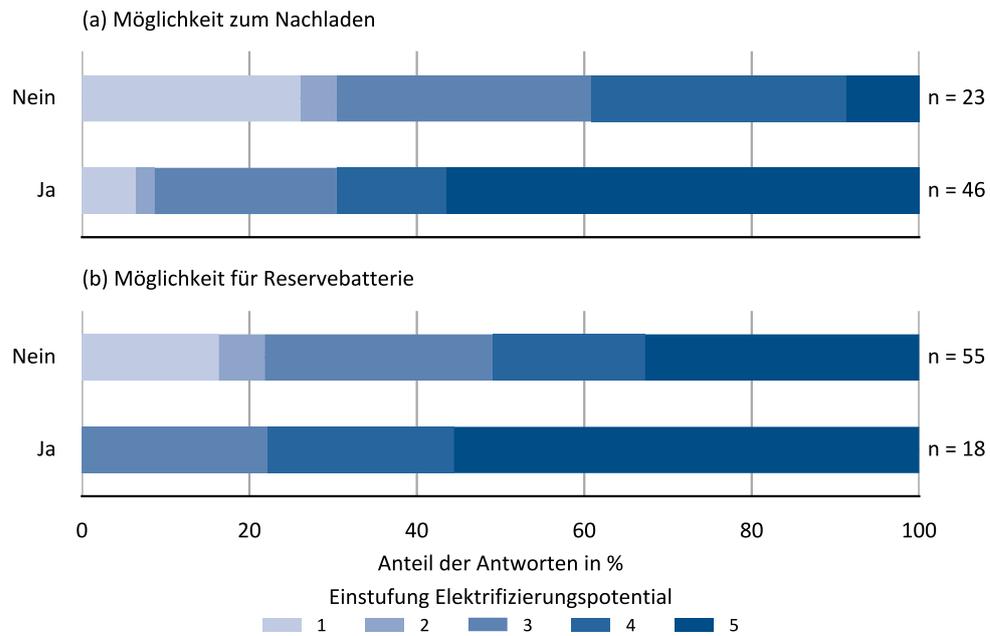
Abbildung 34: Einstufung des Elektrifizierungspotentials bis 2030 für batterieelektrische Non-Road-Maschinen pro Leistungsklasse. Skala von 1 bis 5 mit 5 als Höchstwert für das Elektrifizierungspotential.



Hinweis: n ist die Gesamtanzahl erhaltener Antworten für diese Leistungsklasse. Die Leistungsklassen > 300 kW wurde aufgrund der fehlenden Antworten nicht berücksichtigt.

Grafik INFRAS. Quelle: Befragung AP 1.

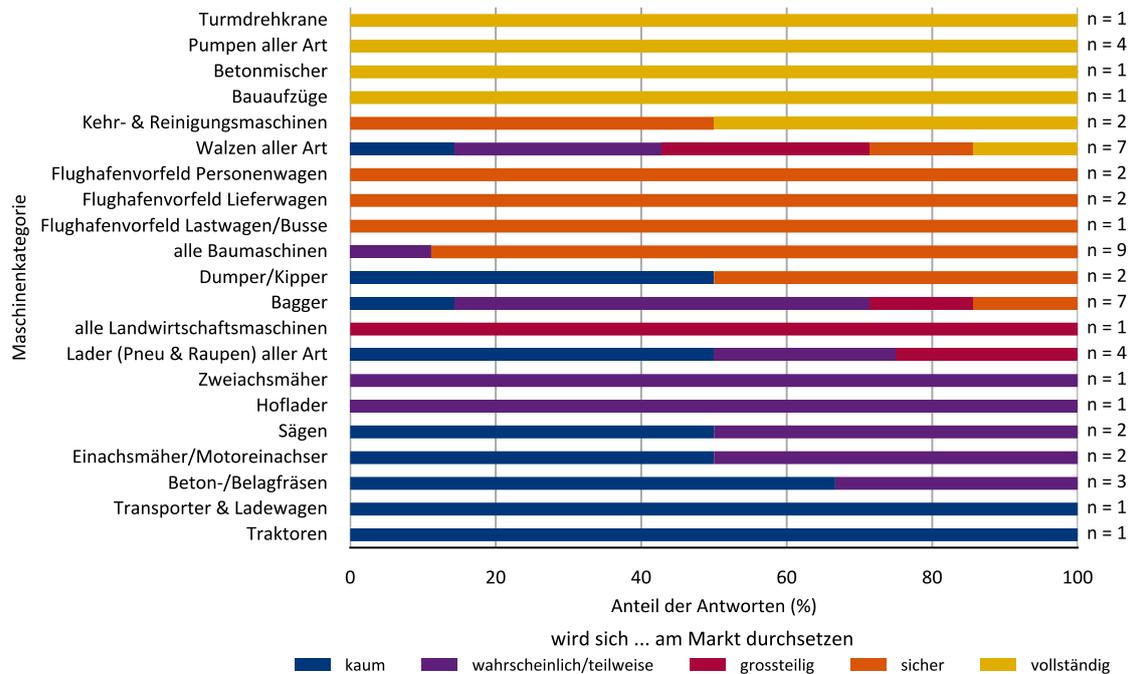
Abbildung 35: Einstufung des Elektrifizierungspotentials bis 2030 für batterieelektrische Non-Road-Maschinen je nach Option für den Betrieb (a)-(b). Skala von 1 bis 5 mit 5 als Höchstwert für das Elektrifizierungspotential.



Hinweis: n ist die Gesamtanzahl erhaltener Antworten für diese Option.

Grafik INFRAS. Quelle: Befragung AP 1.

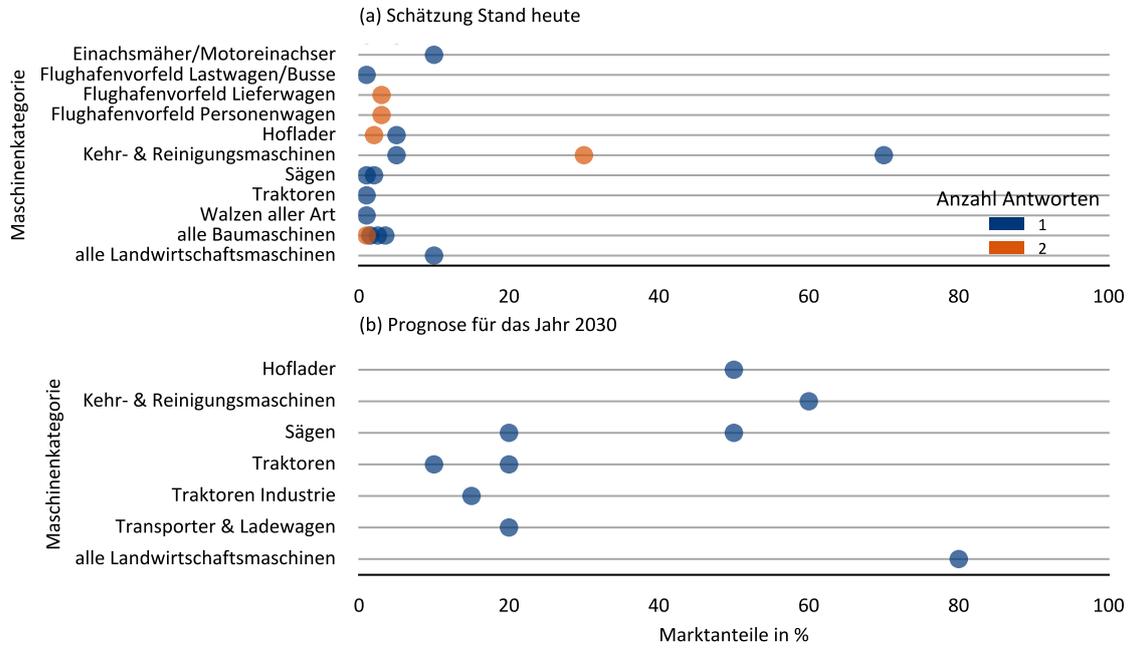
Abbildung 36: Qualitative Abschätzung der Marktanteile für batterieelektrische Non-Road-Maschinen pro Maschinenkategorie.



Hinweis: n ist die Gesamtanzahl erhaltener Antworten für diese Maschinenkategorie.

Grafik INFRAS. Quelle: Befragung AP 1.

Abbildung 37: Abschätzung der Marktanteile in % für batterieelektrische Non-Road-Maschinen pro Maschinenkategorie.



Grafik INFRAS. Quelle: Befragung AP 1.

A2. Marktanalyse: Internetrecherche

Tabelle 12: Übersicht am Markt erhältlicher, angekündigter oder als Prototypen verfügbarer Non-Road-Maschinen mit alternativen Antrieben. Es besteht kein Anspruch auf Vollständigkeit.

Kategorie	Hersteller	Modellbezeichnung	Antriebs- technologie	Leistungs- klasse [kW]	Max. Ein- satzdauer [h] bzw. Reichweite [km]	Ladezeit Standard- / Schnellladung	Verfügbar- keit am Markt
Baumaschinen							
Walzen aller Art	Wacker Neuson	RD28e	BEV	n/a	3.5 h	15 h/7.5 h	unklar
Walzen aller Art	Volvo	DD25 Electric	BEV	18-37	n/a	12 h/3 h	angekündigt
Lader (Pneu & Raupen) aller Art	Volvo	L120H	BEV	130-300	n/a	n/a	angekündigt
Lader (Pneu & Raupen) aller Art	Volvo	L25 Electric	BEV	18-37	8 h	12 h/2 h	Erhältlich
Lader (Pneu & Raupen) aller Art	Volvo	L20 Electric	BEV	18-37	8 h	< 6 h/2 h	Erhältlich
Lader (Pneu & Raupen) aller Art	Bobcat	e-S70	BEV	18-37	3 h	4 h /2.75 h	unklar
Lader (Pneu & Raupen) aller Art	Bobcat	e-S100	BEV	18-37	5 h	4 h /2.5 h	unklar
Lader (Pneu & Raupen) aller Art	JCB	525-60E	BEV	5-18	n/a	8 h /110 min	Erhältlich
Lader (Pneu & Raupen) aller Art	Wacker Neuson	WL20e	BEV	5-18	6 h	10 h/3 h	unklar
Lader (Pneu & Raupen) aller Art	Kramer	5055e	BEV	5-18	4 h	8 h/5 h	unklar
Lader (Pneu & Raupen) aller Art	Kramer	5056e	BEV	18-37	4 h	n/a	unklar
Lader (Pneu & Raupen) aller Art	Kramer	1445E	BEV	18-37	4 h	n/a	unklar
Lader (Pneu & Raupen) aller Art	Schäffer	23e	BEV	18-37	n/a	n/a	Erhältlich
Lader (Pneu & Raupen) aller Art	Schäffer	24e	BEV	18-37	5 h	4 h /30 min	Erhältlich
Lader (Pneu & Raupen) aller Art	Merlo	EW 25.5-60	BEV	37-56	8 h	n/a	Erhältlich
Lader (Pneu & Raupen) aller Art	Merlo	EW 25.5-90	BEV	56-75	8 h	n/a	Erhältlich
Lader (Pneu & Raupen) aller Art	Giant	G2200E	BEV	5-18	n/a	n/a	Erhältlich
Lader (Pneu & Raupen) aller Art	Giant	G2700E	BEV	5-18	n/a	n/a	Erhältlich
Dumper/Kipper	Volvo	TA15	BEV	n/a	n/a	n/a	angekündigt
Dumper/Kipper	JCB	1TE	BEV	5-18	n/a	2 h 35 min/1 h 40 min	Erhältlich
Dumper/Kipper	JCB	HTD-5E	BEV	5-18	8 h	n/a	Erhältlich

Dumper/Kipper	Wacker Neuson	DW15e	BEV	5-18	6.5 h	n/a	unklar
Dumper/Kipper	Wacker Neuson	DT05e	BEV	5-18	5 h	n/a	unklar
Dumper/Kipper	Hutter	50E	BEV	5-18	2 h	n/a	Erhältlich
Dumper/Kipper	Hutter	80E	BEV	5-18	4 h	n/a	Erhältlich
Dumper/Kipper	Hutter	802E	BEV	5-18	4 h	n/a	Erhältlich
Dumper/Kipper	Hutter	804E	BEV	18-37	4 h	n/a	Erhältlich
Dumper/Kipper	Volvo	HX04	H2-FCEV	n/a	4 h	n/a	Prototyp
Dumper/Kipper	emining Switzerland	eDumper No.1	BEV	>560	n/a	n/a	Prototyp
Kompressoren aller Art	atlas copco	B-Air 185-12	BEV	18-37	n/a	n/a	Erhältlich
Kompressoren aller Art	atlas copco	E-Air H185 VSD	Kabel	18-37	n/a	n/a	Erhältlich
Kompressoren aller Art	atlas copco	E-Air H250 VSD	Kabel	18-37	n/a	n/a	Erhältlich
Kompressoren aller Art	atlas copco	E-Air H450 VSD	Kabel	56-75	n/a	n/a	Erhältlich
Kompressoren aller Art	atlas copco	E-Air H110 VSD	Kabel	130-300	n/a	n/a	Erhältlich
Bohrgeräte aller Art (spez. Tiefbau)	Liebherr	LB 16 unplugged	BEV+Kabel	130-300	10 h	n/a	Erhältlich
Bohrgeräte aller Art (spez. Tiefbau)	Liebherr	LB 25 unplugged	BEV+Kabel	300-560	4 h	n/a	Erhältlich
Bohrgeräte aller Art (spez. Tiefbau)	Liebherr	LB 30 unplugged	BEV+Kabel	300-560	4 h	n/a	Erhältlich
Minibagger	Volvo	ECR25 Electric	BEV	5-18	4 h	5 h /50 min	Erhältlich
Minibagger	Volvo	ECR18 Electric	BEV	5-18	5 h	5 h /1 h	Erhältlich
Minibagger	Volvo	EC18 Electric	BEV	5-18	6 h	6 h/1 h 15 min	Erhältlich
Minibagger	Bobcat	E10e	BEV+Kabel	5-18	8 h	über Nacht /1 h	Erhältlich
Minibagger	JCB	19C-1E	BEV	5-18	4 h	8 h/2.5 h	Erhältlich
Minibagger	Wacker Neuson	EZ17e	BEV	5-18	7 h	15 h/7.5 h	unklar
Minibagger	Hutter	U10E	BEV	5-18	n/a	n/a	Erhältlich
Minibagger	Hutter	U17E	BEV	5-18	n/a	n/a	Erhältlich
Notstromaggregate/Generatoren	emost	Butler S50/25	BEV	37-56	n/a	n/a	Erhältlich
Raupenbagger	SUNCAR / Huppen- kothen	TB260E	BEV+Kabel	37-56	6 h	n/a	Prototyp
Raupenbagger	SUNCAR / KTEG GmbH	ZE85	BEV+Kabel	37-56	5.5 h	105 min/45 min	Prototyp
Raupenbagger	Volvo	EC230	BEV	75-130	5 h	n/a	angekündigt
Raupenbagger	Nasta	Zeron ZE350LC	BEV+ Kabel	130-300	0.23 km	n/a	Prototyp
Raupenbagger	Doosan	DX300LC Electric	BEV	130-300	n/a	n/a	Prototyp
Raupenbagger	Liebherr	R 992-E	BEV	300-560	n/a	n/a	Erhältlich
Raupenbagger	Liebherr	R 998 SME-E	BEV	300-560	n/a	n/a	Erhältlich

Raupenbagger	Liebherr	R 9XX H2	H2-VKM	n/a	n/a	n/a	angekündigt
Radbagger	Liebherr	LH 26 Industry Litronic	BEV	75-130	n/a	n/a	Erhältlich
Radbagger	Sennebogen	817E	BEV+Kabel	56-75	6 h	n/a	Erhältlich
Radbagger	Sennebogen	821E	BEV	75-130	6 h	n/a	Erhältlich
Radbagger	Sennebogen	825E	BEV	75-130	6 h	n/a	Erhältlich
Radbagger	Sennebogen	830E	BEV	130-300	n/a	n/a	Erhältlich
Radbagger	Sennebogen	835E	BEV	130-300	n/a	n/a	Erhältlich
Radbagger	Sennebogen	840E	BEV	130-300	n/a	n/a	Erhältlich
Radbagger	Sennebogen	850E	BEV	130-300	n/a	n/a	Erhältlich
Notstromaggregate/Generatoren	Nordic Booster	Hummingbird®	BEV	300-560	n/a	n/a	Erhältlich
Notstromaggregate/Generatoren	Kohler	Kohler Hydrogen Fuel Cell System	H2-FCEV	>560	n/a	n/a	Erhältlich
Industrie							
Gabelstapler aller Art	JCB	30-19E	BEV	n/a	8 h	n/a	Erhältlich
Gabelstapler aller Art	JCB	35-22E	BEV	37-56	8 h	n/a	Erhältlich
Kehr- & Reinigungsmaschinen	Boschung	Pony P3.0	BEV	37-56	10 h	8 h /100 min	Erhältlich
Kehr- & Reinigungsmaschinen	Boschung	Urban Sweeper S2.0	BEV	75-130	10 h	8 h/100 min	Erhältlich
Kehr- & Reinigungsmaschinen	Bucher Municipal	CityCat V20e	BEV	75-130	10 h	n/a	Erhältlich
Kehr- & Reinigungsmaschinen	Bucher Municipal	CityCat VS20e	BEV	130-300	7 h	n/a	Erhältlich
Kehr- & Reinigungsmaschinen	Bucher Municipal	CityCat VR50e	BEV	300-560	10 h	5-6 h/1.5-2h	Erhältlich
Kehr- & Reinigungsmaschinen	Bucher Municipal	MaxPowa V65e	BEV	n/a	8 h	8-9 h/4-5 h	Erhältlich
Kehr- & Reinigungsmaschinen	Bucher Municipal	CityFlex C40e	BEV	37-56	5 h	11-12 h/2-3 h	Erhältlich
Kehr- & Reinigungsmaschinen	Hako	Citymaster 1650 ZE	BEV	75-130	9 h	n/a	Erhältlich
Kehr- & Reinigungsmaschinen	Aebi Schmidt	eSwingo 200+	BEV	130-300	10 h	n/a	Erhältlich
Kehr- & Reinigungsmaschinen	Aebi Schmidt	eCleango 550	BEV	5-18	10 h	n/a	angekündigt
Kehr- & Reinigungsmaschinen	Greenmachines	500ze	BEV	56-75	8 h	7 h/4 h	Erhältlich
Kehr- & Reinigungsmaschinen	TKSA Ravo	Ravo-5 e-Series	BEV	18-37	8 h	4.5 h/2 h	Erhältlich
Kehr- & Reinigungsmaschinen	Jungo	Sweepjet	BEV	n/a	n/a	n/a	Erhältlich
Hubarbeitsbühnen (Ind)	JCB		0 n/a	n/a	n/a	n/a	unklar
Flughafenvorfeld Lastwagen/Busse	e.cobus	e.COBUS 3000 New	BEV	18-37	n/a	n/a	Erhältlich
Wechselaufbau? Kehrmaschine?	Jungo	Jungojet 3.0	BEV	5-18	n/a	n/a	Erhältlich
Landwirtschaft							
Einachsmäher/Motoreinachser	Aebi Schmidt	CC 140e	BEV	37-56	n/a	n/a	angekündigt

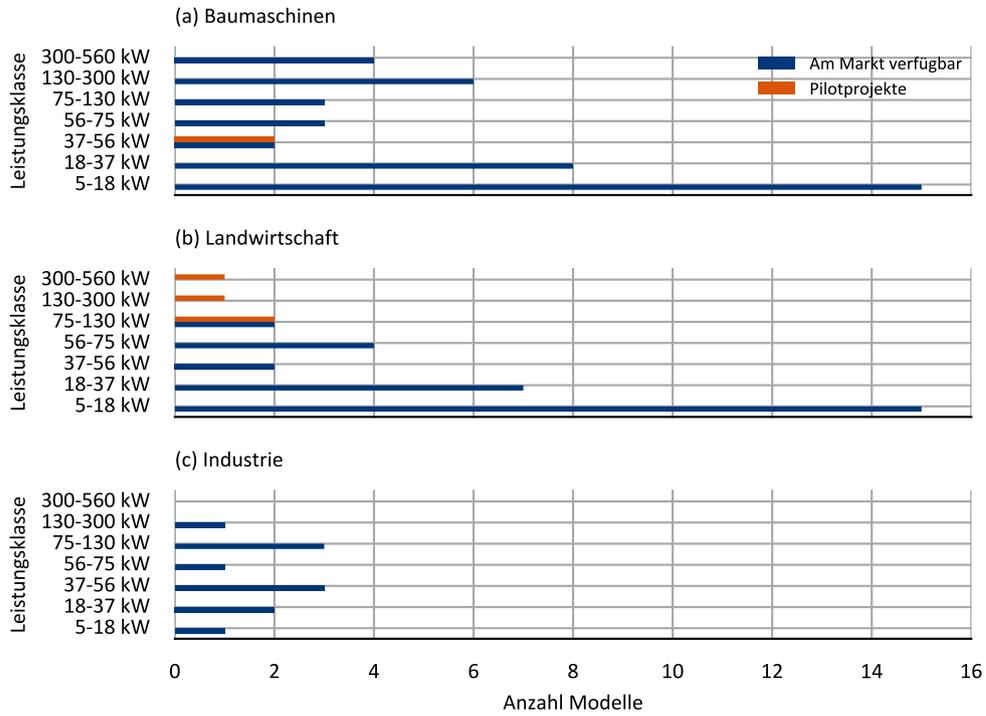
Traktoren LW	Weidemann	1190e	BEV	18-37	3.27 h	10 h /4 h	Erhältlich
Traktoren LW	Rigitrac	SKE 40	BEV	75-130	6 h	n/a	Erhältlich
Traktoren LW	Fendt	e300 Vario	BEV	130-300	8 h	n/a	Prototyp
Traktoren LW	John Deere	Prototyp Sesam	BEV	130-300	4 h	n/a	Prototyp
Traktoren LW	Auga Group	M1	CNG-hybrid	130-300	n/a	n/a	Prototyp
Traktoren LW	Fendt	e100 Vario	BEV	300-560	4 h	3 h/45 min	angekündigt
Traktoren LW	John Deere	Prototyp Sesam2	BEV	300-560	8 h	n/a	Prototyp
Zweiachsmäher	Reform	3003S	BEV	56-75	n/a	n/a	Prototyp
Transporter & Ladewagen	Aebi Schmidt	eVT 450 Vario	BEV	56-75	4 h	n/a	Prototyp
Transporter & Ladewagen	Bucher Municipal	Ladog E1250	BEV	5-18	n/a	n/a	Erhältlich
Transporter & Ladewagen	Bucher Municipal	Ladog E1400	BEV	18-37	n/a	n/a	Erhältlich
Transporter & Ladewagen	Etesia	ET-lander	BEV	5-18	n/a	n/a	Erhältlich
Transporter & Ladewagen	EVUM Motors	aCar	BEV	5-18	200 km	5.5 h/7.5 h/2.3 h/3.2 h	Erhältlich
Transporter & Ladewagen	Toro Hako	Workman GTX Electro	BEV	5-18	n/a	n/a	Erhältlich
Transporter & Ladewagen	Addax	MT	BEV	5-18	120 km	n/a	Erhältlich
Transporter & Ladewagen	Alkè	ATX	BEV	18-37	181 km	3.5 h/6.5 h/1.5 h/2.6 h	Erhältlich
Transporter & Ladewagen	Spykstaal	Spijkstaal 1000	BEV	37-56	n/a	n/a	Erhältlich
Transporter & Ladewagen	Spykstaal	Spijkstaal 2500	BEV	5-18	n/a	n/a	Erhältlich
Transporter & Ladewagen	Züko	ecarry	BEV	18-37	250 km	n/a	Erhältlich
Transporter & Ladewagen	Züko	N50	BEV	18-37	83 km	n/a	Erhältlich
Transporter & Ladewagen	Elion	M40	BEV	5-18	6.5 h	n/a	Erhältlich
Transporter & Ladewagen	Elion	M65	BEV	18-37	8.5 h	n/a	Erhältlich
Transporter & Ladewagen	Elion	T20L	BEV	5-18	118 km	7.5 h/2.5 h	Erhältlich
Transporter & Ladewagen	Elion	T40L	BEV	5-18	194 km	10 h/4.5 h	Erhältlich
Transporter & Ladewagen	Tropos	ABLE NXT	BEV	5-18	150 km	n/a	Erhältlich
Transporter & Ladewagen	Tropos	ABLE NXT	BEV	18-37	150 km	n/a	Erhältlich
Transporter & Ladewagen	Tropos	ABLE RHD	BEV	56-75	150 km	n/a	Erhältlich
Transporter & Ladewagen	MK Fahrzeuge	ELI	BEV	56-75	110 km	6.5 h/6.5 h	Erhältlich
Transporter & Ladewagen	Meili	Beat.e	BEV	75-130	8 h	4 h /1 h	Erhältlich
Transporter & Ladewagen	Meili	Reto.e	BEV	18-37	8 h	4 h /1 h	Erhältlich
Transporter & Ladewagen	Meili	Urs.e	BEV	5-18	7 h	4 h /1 h	Erhältlich
Transporter & Ladewagen	Klingler	EGT 6000	BEV	5-18	n/a	n/a	Erhältlich
Hoflader	Weidemann	1160e	n/a	5-18	4 h	n/a	Erhältlich

Hoflader	EcoLoad	Zero 4e	BEV	5-18	n/a	n/a	Erhältlich
Hoflader	EcoLoad	Zero 4e	BEV	75-130	6 h	n/a	Erhältlich
Hoflader	Eurotrac	W11-E	BEV	n/a	6 h	6 h/2 h	Erhältlich
Vollernter	Logset	12h GTE Hybrid	D-Hybrid	n/a	n/a	n/a	Erhältlich

Hinweis: Standardladung/Schnellladung bezieht sich auf die Ladung in unterschiedlichen Konditionen (Spannung, Stromstärke), Details sind in den Datenangaben der Hersteller vermerkt. Es besteht kein Anspruch auf Vollständigkeit.

Tabelle INFRAS. Quelle: Internetrecherche AP 1.

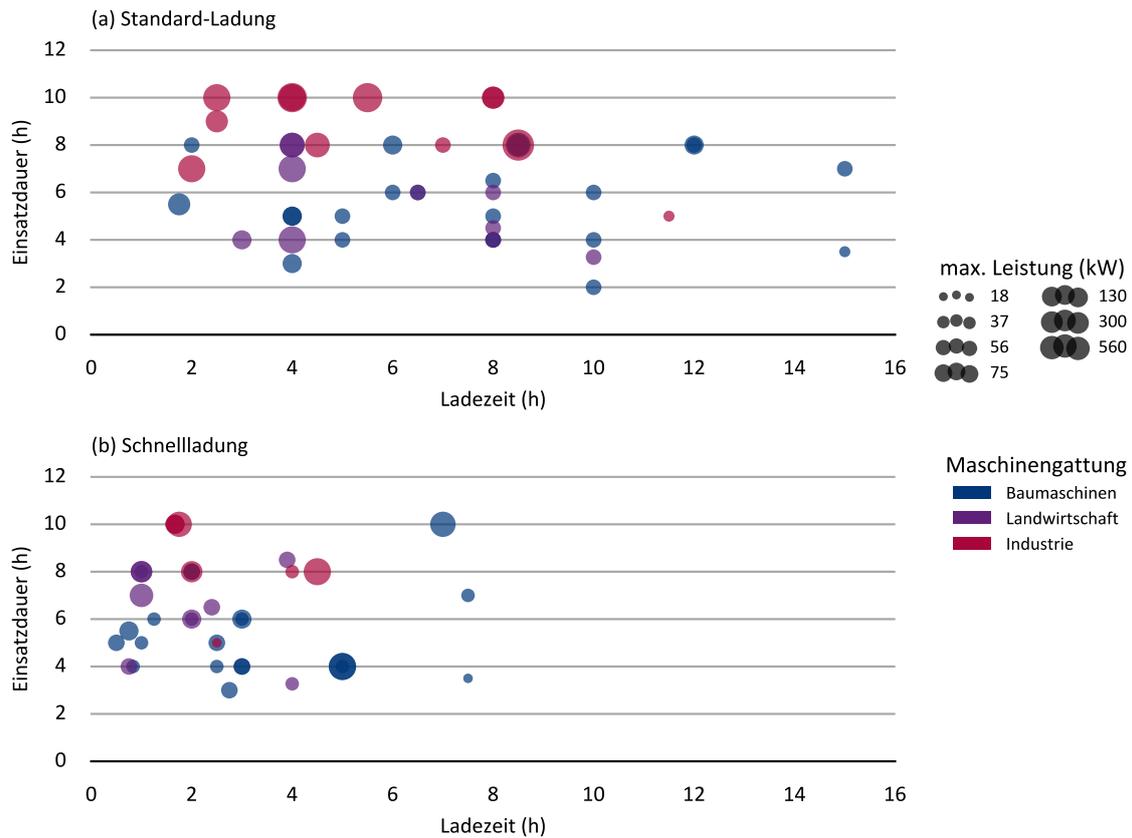
Abbildung 38: Ergebnisse der Internetrecherche zu batteriebetriebenen Non-Road-Maschinen pro Maschinengattung (a)-(c) in verschiedenen Leistungsklassen. Die Modelle sind entweder als Serienproduktion am Markt verfügbar oder Unikate aus Pilotprojekten.



Hinweis: Es besteht kein Anspruch auf Vollständigkeit. Zum Teil ist die Zuordnung zur Maschinengattung nicht streng, da einzelne Modelle flexibel eingesetzt werden können.

Grafik INFRAS. Quelle: Internetrecherche AP 1.

Abbildung 39: Angaben zu Einsatzdauer gegenüber Ladezeit einzelner Modelle für elektrische Non-Road-Maschinen verschiedener Gattungen (Farbe) und Leistungsklassen (Grösse). Die Daten stammen aus den technischen Datenblättern der Hersteller. (a) zeigt Ladezeiten unter Standardbedingungen (z.B. On-Board Ladegerät, 230 V, 16 A, Ladung mind. auf 80%), (b) zeigt die Schnellladeoption (z.B. externes Ladegerät mit 400 V, 32 A, Ladung mind. auf 80%), wobei sich der Detailgrad in den Angaben zwischen den Herstellern unterscheidet. Die Laufzeit ist die mittlere erwartete Laufzeit, wenn die Maschine für typische Arbeiten eingesetzt wird.



Hinweis: Es besteht kein Anspruch auf Vollständigkeit.

Grafik INFRAS. Quelle: Internetrecherche AP 1.

A3. Mengengerüst

Tabelle 13: Ergänzungen in der Zuordnung von IVZ Karosserieformen zu Maschinenkategorien des Inventars (BAFU, 2015). Alle zugeordneten IVZ Karosserieformen kommen in den Fahrzeugarten Arbeitskarren und Arbeitsmaschine vor.

Gattung Emissionsinventar	Kategorie Emissionsinventar	Karosserieformen IVZ	Ergänzung zu bisheriger Zuordnung (BAFU, 2015)
Baumaschinen	Lader (Pneu & Raupen) aller Art	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Greifer ▪ Ladeschaufel ▪ Ladeschaufel / Bagger ▪ Ladeschaufel / Heckbagger ▪ <i>Ladeschaufel / Heckgreifer</i> 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Neu: Berücksichtigung der Karosserieform «Ladeschaufel / Heckgreifer»
	Hubarbeitsbühnen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Arbeitsbühne 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Im bisherigen Emissionsinventar nicht aus IVZ klassifiziert
Industrie	Kehr- & Reinigungsmaschinen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kehrmaschine ▪ Reinigungsmaschine ▪ <i>Schwemmwagen</i> 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Neu: Berücksichtigung der Karosserieform «Schwemmwagen»

Tabelle INFRAS.

Tabelle 14: Mengengerüst der Non-Road-Maschinen im Kanton ZH, Stand 2023 (BAFU, 2015; IVZ, 2023).

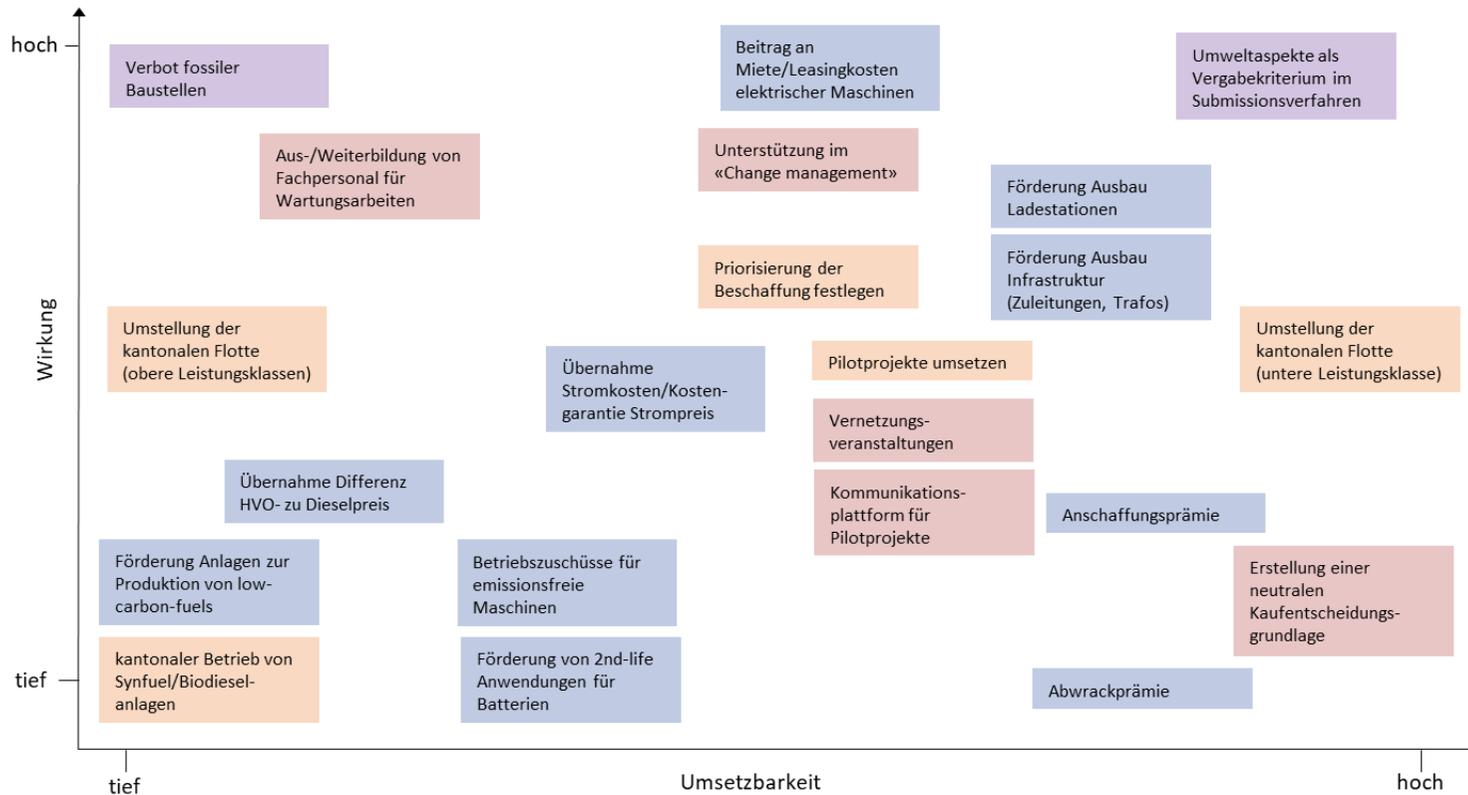
Maschinenkategorie	Antriebstechnologie	Bestand	Spez. Betriebsstunden (h/a)	Endenergieverbrauch (TJ/a)	CO ₂ -Emissionen (t/a)
Baumaschinen					
Strassenfertiger	Diesel	56	300	3.9	287.4
Rambären aller Art mit Hydraulik-Aggregaten	Diesel	11	300	0.8	57.5
Walzen aller Art	Diesel	484	300	15.5	1'134.2
Vibratoren maschinell	Diesel	10	301	0.6	42.7
Stampfer, Vibratoren handgeführt	Diesel	537	300	2.6	190.9
Stampfer, Vibratoren handgeführt	Benzin (4-Takt)	267	350	1.5	111.8
Seilbagger	Diesel	21	200	1.6	120.4
Pneu-/Mobilkräne	Diesel	142	323	24.0	1'754.8
Grader	Diesel	6	501	1.9	137.4
LKW ohne Strassen-Zulassung	Diesel	27	700	17.8	1'304.7
Planiertrauben	Diesel	53	350	11.5	841.4
Lader (Pneu & Rauben) aller Art	Diesel	1'014	506	112.9	8'268.3
Dumper/Kipper	Diesel	1'203	500	110.8	8'116.5
Notstromaggregate/Generatoren	Diesel	189	80	14.2	1'039.7
Notstromaggregate/Generatoren	Benzin (4-Takt)	421	118	2.5	182.8
Pumpen aller Art	Diesel	30	146	0.5	39.6
Pumpen aller Art	Benzin (4-Takt)	56	146	0.2	13.8
Kompressoren aller Art	Diesel	1'205	200	72.0	5'277.6
Hubarbeitsbühnen	Diesel	86	310	6.9	506.3
Beton-/Belagfräsen	Diesel	31	461	9.5	695.8
Beton-/Belagfräsen	Benzin (4-Takt)	193	473	9.7	711.5
Grabenfräse	Diesel	9	300	0.3	22.1
Bohrgeräte aller Art (spez. Tiefbau)	Diesel	41	605	8.9	654.2
Minibagger	Diesel	1'674	528	62.9	4'607.3
Raunenbagger	Diesel	1'069	735	354.1	25'941.2
Radbagger	Diesel	405	714	67.3	4'926.7

Maschinenkategorie	Antriebstechnologie	Bestand	Spez. Betriebsstunden (h/a)	Endenergieverbrauch (TJ/a)	CO ₂ -Emissionen (t/a)
Industrie					
Gabelstapler aller Art	Diesel	1'079	720	89.3	6'543.0
Gabelstapler aller Art	Benzin (4-Takt)	54	720	4.2	310.1
Gabelstapler aller Art	Elektrizität	8'635	720	94.3	-
Gabelstapler aller Art	Flüssiggas	216	720	26.8	1'493.3
Kehr- & Reinigungsmaschinen	Diesel	57	1000	12.8	936.9
Hubarbeitsbühnen (Ind)	Diesel	351	500	32.1	2'348.8
Hubarbeitsbühnen (Ind)	Elektrizität	527	500	3.7	-
Traktoren Ind	Diesel	607	300	34.0	2'488.6
Pistenfahrzeuge	Diesel	26	700	15.9	1'167.0
Flughafenvorfeld Personenwagen	Benzin (4-Takt)	441	480	22.4	1'653.0
Flughafenvorfeld Personenwagen	Diesel	213	480	9.0	661.4
Flughafenvorfeld Personenwagen	Elektrizität	42	480	1.2	-
Flughafenvorfeld Personenwagen	Flüssiggas	14	480	0.6	35.4
Flughafenvorfeld Lieferwagen	Benzin (4-Takt)	51	380	2.4	180.0
Flughafenvorfeld Lieferwagen	Diesel	233	380	9.7	714.1
Flughafenvorfeld Lastwagen/Busse	Diesel	299	100	9.3	684.7
Flughafenvorfeld Generatoren	Diesel	71	900	43.5	3'188.6
Flughafenvorfeld Traktoren	Elektrizität	245	300	8	-
Flughafenvorfeld Abfertigungsgeräte	Diesel	46	601	3.0	223.4
Flughafenvorfeld Abfertigungsgeräte	Elektrizität	416	601	11.6	-
Generatoren Industrie/Gewerbe/öffentliche Hand	Diesel	54	307	13.2	966.8
Landwirtschaft					
Einachsmäher/Motoreinachser	Benzin (4-Takt)	1'950	120	15.7	1'154.0
Traktoren LW	Diesel	8'690	182	377.2	27'631.1
Mähdrescher	Diesel	85	115	6.5	475.7
Spritzmaschinen	Diesel	68	134	0.8	61.2
Feldhäcksler	Diesel	83	120	15.2	1'112.9
Zweiachsmäher	Diesel	752	123	14.2	1'038.0
Transporter & Ladewagen	Diesel	635	80	8.4	616.1
Hoflader	Diesel	548	100	7.0	512.3

Maschinenkategorie	Antriebstechnologie	Bestand	Spez. Betriebsstunden (h/a)	Endenergieverbrauch (TJ/a)	CO ₂ -Emissionen (t/a)
Traktoren (hobby)	Diesel	1'481	15	3.6	266.1
Traktoren (hobby)	Benzin (4-Takt)	241	21	0.6	41.6
Zuckerrübensvollernter	Diesel	13	140	2.3	168.4
Forstwirtschaft					
Seil- und Zangenschlepper	Diesel	42	607	5.8	425.4
Vollernter	Diesel	1	902	0.7	53.9
Holzhacker	Diesel	2	901	2.5	179.7
Radbagger FW	Diesel	2	544	0.4	28.0
Tragschlepper und Klemmbankschlepper	Diesel	6	921	3.4	249.9
Konventionelle Seilkräne	Diesel	2	550	0.2	13.3
Mobilseilkräne	Diesel	2	583	0.3	19.6
Kombiseilgeräte	Diesel	1	906	0.3	22.8
Gartenpflege/Hobby					
Aufsitzmäher (prof)	Benzin (4-Takt)	785	200	6.7	491.2
Aufsitzmäher (hobby)	Benzin (4-Takt)	1'512	13	0.8	59.3

A5. Fördermassnahmen

Abbildung 40: Bewertung der Fördermassnahmen nach Wirkung und Umsetzbarkeit durch die Workshop-Teilnehmer:innen vom 22.05.2024, vor der Überarbeitung durch INFRAS. Die finale Bewertung nach Überarbeitung durch INFRAS ist in Abbildung 4 resp. Abbildung 21 abgebildet.



Handlungsfelder: Finanzierung | Regulierung | Projekt-/Wissensunterstützung | Vorreiter Kanton

Grafik INFRAS. Quellen: Workshop vom 22.05.2024

Glossar

Abkürzung	Erklärung
Batterieelektrisch betriebene Maschinen	Maschine funktioniert rein mit Elektromotor. Energiespeicherung in Batterie/Akku.
C40 Cities	Internationales Netzwerk von 100 Bürgermeister:innen, die Vorbildfunktionen in der Arbeit gegen die Klimakrise einnehmen.
Enova	Norwegisches Staatsunternehmen unter Verwaltung des Klima- und Umweltministeriums; tätig u.a. in der Förderung für umweltfreundliche Energieerzeugung und -verbrauch.
HBEFA	Handbuch Emissionsfaktoren für den Strassenverkehr
HC	Kohlenwasserstoffe («Hydrocarbons»)
HVO	Hydrierte Pflanzenöle («Hydrogenated/Hydrotreated Vegetable Oils»); Biogener, synthetischer Treibstoff, wird als Beimischung zu fossilen Kraftstoffen oder Reinkraftstoff eingesetzt.
Hybride Maschinen	In dieser Studie hauptsächlich nicht extern aufladbare (NOVC-HEV, «Not Off Vehicle Charging Hybrid Electric Vehicles») oder Plug-in-hybride (d.h. mit Stecker aufladbare) Elektrofahrzeuge. Der Elektromotor dieser Maschinen dient zur Verwertung der rekuperierten Energie und zur Unterstützung des Verbrennungsmotors (Kapitel 2.3).
IVZ	Informationssystem Verkehrszulassung (ehemalig: MOFIS)
Kabelelektrisch betriebene Maschinen	Die Maschine funktioniert rein mit Elektromotor und ist im Betrieb mit Kabel ans Netz angeschlossen.
KliK	Stiftung Klimaschutz und CO ₂ -Kompensation, übernimmt die Durchführung der CO ₂ -Kompensationspflicht für fossile Treibstoffimporteure in der Schweiz.
NOx	Stickoxide
PEIK	Professionelle Energieberatung für KMU von EnergieSchweiz; unterstützt Schweizer KMU ihre Energieeffizienz zu verbessern.
PM10	Feinstaub-Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser kleiner als 10 Mikrometer
PW	Personenwagen
VEG	Vorgezogene Entsorgungsgebühr. Bundesweite Gebühr, die für Sammlung, Transport und stoffliche Verwertung von Batterien anfällt.
Wasserstoffbetriebene Maschinen	In dieser Studie werden unter dieser Kategorie Maschinen mit Brennstoffzellen und Wasserstoff-Verbrennungsmotoren als Antriebstechnologie zusammengefasst (Kapitel 2.3).

Tabelle INFRAS.

Literatur

- ASTRA 2024:** IVZ - Informationssystem Verkehrszulassung. Bundesamt für Strassen (ASTRA). [<https://www.astra.admin.ch/astra/de/home/fachleute/weitere-bereiche/fachanwendungen/ivz.html>].
- AWEL 2018:** Klimawandel im Kanton Zürich - Massnahmenplan Verminderung der Treibhausgase. [https://www.zh.ch/content/dam/zhweb/bilder-dokumente/themen/umwelt-tiere/klima/massnahmenplaene/massnahmenplan_verminderung.pdf].
- BAFU 2015:** Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des Non-Road-Sektors. Studie für die Jahre 1980-2050. Umwelt-Wissen Nr. 1519. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern. [<https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/luft/publikationen-studien/publikationen/energieverbrauch-und-schadstoffemissionen-des-non-road-sektors.html>].
- BAFU 2023:** Grenzwerte für Lärm. Bundesamt für Umwelt (BAFU). [<https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/laerm/fachinformationen/laermbelastung/grenzwerte-fuer-laerm.html>].
- BFE 2023:** FAQ - CO₂-Emissionsvorschriften für Personenwagen. [<https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/effizienz/mobilitaet/co2-emissionsvorschriften-fuer-neue-personen-und-lieferwagen/personenwagen/faq.html>].
- BFS 2024:** Flugpassagiere im Linien- und Charterverkehr - 1990-2023 | Diagramm. Bundesamt für Statistik. [<https://www.bfs.admin.ch/asset/de/30265473>].
- Budden, J. J., Williamson, C. 2019:** Danfoss Digital Displacement Excavator: Test results and analysis. Danfoss Power Solutions. [<https://files.danfoss.com/download/PowerSolutions/Electroniccontrols/Papers%20and%20technical%20presentations/Danfoss%20Digital%20displacement%20excavator%20test%20results%20and%20analysis.pdf>].
- EC 2014:** Non-Road Mobile Machinery. Revision of Directive 97/68/EC. Presentation held at the GEME (Expert group on emissions from Non-Road Mobile Machinery Engine) Meeting of Feb. 13, 2014. European Commission (EC; nicht publiziert).
- ERM 2023:** Industrial Non-Road Mobile Machinery Decarbonisation Options: Techno-Economic Feasibility Study. UK Department for Energy Security and Net Zero – DESNZ. [<https://www.gov.uk/government/publications/non-road-mobile-machinery-decarbonisation-options-feasibility-study>].
- INFRAS 2015:** Online Datenbank Schweizer Non-Road Maschinen. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Ittigen. [<https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/luft/zustand/non-road-datenbank.html>].
- Lajunen, A., Sainio, P., Laurila, L., Pippuri-Mäkeläinen, J., Tammi, K. 2018:** Overview of Powertrain Electrification and Future Scenarios for Non-Road Mobile Machinery. *Energies* 11(5), 1184.

Lithium System 2024: eDumper. Lithium System AG, Wetzikon. [<https://lithiumsystem.ch/projekte/edumper/>].

Notter, B., Keller, M., Cox, B. 2022: HBEFA. Handbuch Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs 4.2. Kurzanleitung. INFRAS, Bern. [https://hbefa.net/d/help/HBEFA42_help_dt.pdf].

Stadt Zürich 2022: E-Baustelle. Nutzen und Machbarkeit der Elektrifizierung von Baustellen. Stadt Zürich, Amt für Hochbauten, Fachstelle nachhaltiges Bauen. [<https://www.stadtzuerich.ch/hbd/de/index/hochbau/bauen-fuer-2000-watt/grundlagen-studienergebnisse/2022-08-nb-ebaustellen.html>].

Stiftung KliK 2023: Die Stiftung KliK unterstützt E-Baufahrzeuge. [<https://baufahrzeuge.klik.ch/>].