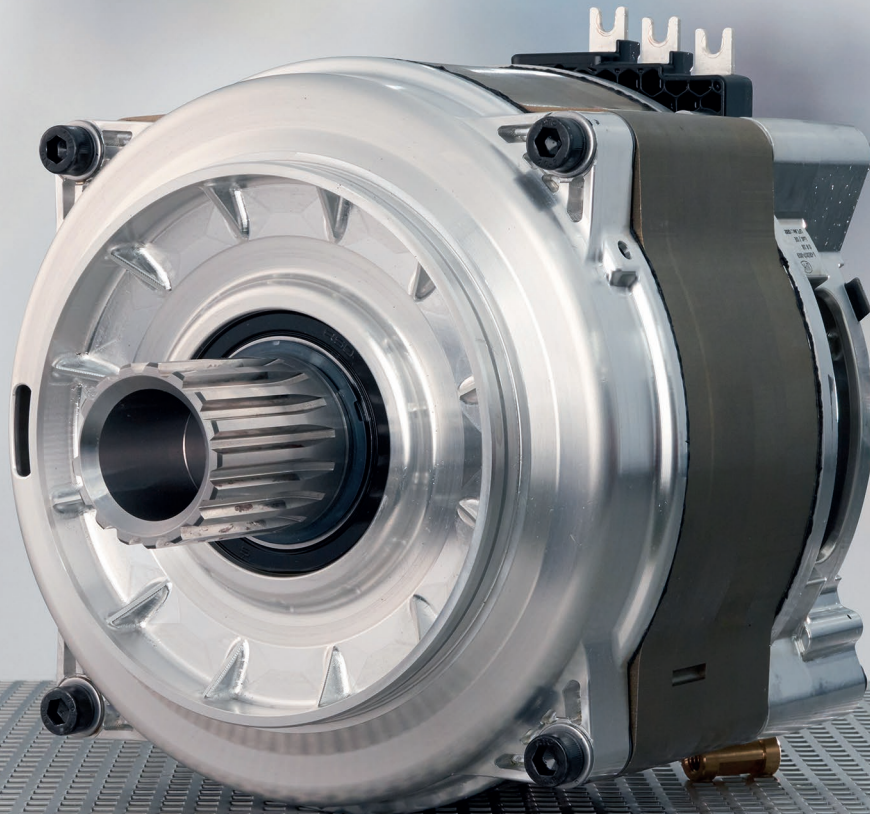


We pioneer motion

Nachhaltige Baumaschinen der Zukunft

Wie ein Zulieferer mit optimierten und effizienten Produkten
GHG Emissionen reduziert.



Inhaltsverzeichnis

Impressum	04
Megatrends als Treiber des technologischen Wandels	05
Elektrifizierung in der Baumaschine	06
Elektrische Subsysteme und Komponenten	10
Elektrische Antriebskonzepte	12
E-Motoren	14
Wälzlagertechnik	18
Literaturverzeichnis	22

Impressum



Patrick Scherr

verantwortet seit 2017 den Geschäftsbereich Offroad Europa. Nach seinem Masterstudiengang an der TU Wien trat er im Jahr 2003 Schaeffler bei und sammelte dort in unterschiedlichen Funktionen global Erfahrung im Industrie- und Automobilbereich. Aktuell liegt der Fokus auf der Weiterentwicklung reibungsoptimierter Wälzlager sowie der Elektrifizierung.



Tobias Hofmann

Nach Abschluss seines Dualen Studiums zum Industriemechaniker und Bachelor of Engineering Maschinenbau in Kooperation mit Schaeffler Technologies AG & Co. KG, startete Tobias Hofmann im Jahr 2017 in der Anwendungstechnik Baumaschinen. Im Zuge des abgeschlossenen MBA Studiums Engineering Management, kümmert er sich außerdem als Key Account Manager um einen Kunden aus der Baumaschinenbranche. Neben der Weiterentwicklung des Wälzlagergeschäfts stehen die Elektrifizierung und Sensorisierung im Mittelpunkt.



Simon Wienröder

ist seit 2018 Student an der Universität Bayreuth mit Schwerpunkt Wirtschaftswissenschaften und arbeitet seit Anfang 2021 im Bereich Business Development der Abteilung Offroad bei Schaeffler Technologies AG & Co. KG. Nach Einarbeitung in die E-Mobilität und Nachhaltigkeit im Offroad Sektor in seinem ersten Praktikum ist er nun als Werksstudent federführend verantwortlich für diese Themen.

Megatrends als Treiber des technologischen Wandels

Der Klimawandel sowie die neuesten wissenschaftlichen Erkenntnisse zwingen die Politik und Unternehmen zum unmittelbaren Handeln. Insbesondere der sechste Sachstandsbericht des IPCC zu den wissenschaftlichen Grundlagen des Klimawandels verdeutlicht erneut die Dringlichkeit CO₂-Emissionen auf netto Null zu begrenzen (vgl. IPCC, 2021, S. 36). Neben diesem globalen und alles übergreifenden Phänomen des anthropogenen Klimawandels, sowie den daraus resultierenden politischen Maßnahmen zur Erreichung definierter Klimaziele, werden auch das Bevölkerungswachstum, die Urbanisierung und der demografische Wandel die Baumaschinenbranche in ihrer Struktur stark verändern. Der steigende Bedarf an Wohnungen sowie Infrastruktur, die Ressourcenknappheit und der unausweichlich folgende Arbeitskräftemangel haben direkten Einfluss auf die Bedürfnisse der Endkunden. Absehbare Auswirkungen auf die Baumaschinenbranche werden in diesem Whitepaper dargestellt und potenzielle Konzepte als Antwort vorgestellt.

Die Herausforderungen sowie deren Bedeutung für die Baumaschinenindustrie inklusive des potenziellen Schaeffler Beitrages, sind in Abbildung 1 zusammengefasst.

In diesem Paper wird der Fokus auf den Trend der Elektrifizierung gelegt. Durch reibungsoptimierte Wälzlager kann Schaeffler jedoch auch bei konventionellen Antriebssträngen mit konventionellen aber bspw. auch synthetischen Kraftstoffen einen nachhaltigen Beitrag in Richtung CO₂-Reduzierung leisten.

Die verheerenden Folgen des Klimawandels sind längst nicht mehr theoretische Modellierungen der Wissenschaft. Sie sind da. Jetzt.

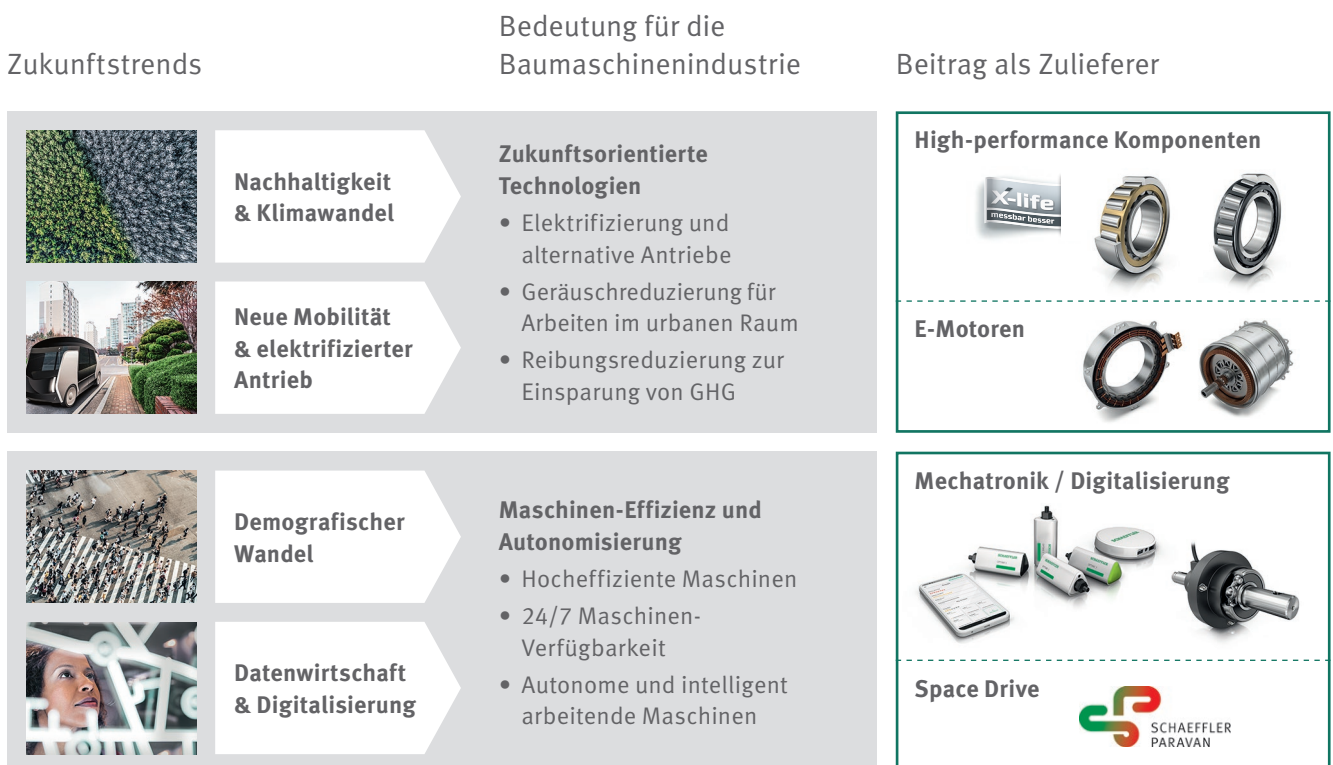


Abbildung 1: Zukunftstrends und Lösungen von Schaeffler

Elektrifizierung in der Baumaschine

Die Maschinen im Offroad-Bereich werden heute nach wie vor vom klassischen Dieselmotor dominiert – nicht zuletzt wegen dessen Wirtschaftlichkeit. Alternative Antriebe werden jedoch als wichtiger Schritt zur Erreichung der Netto-Null-CO₂-Emissionen gesehen. So ermittelte PORSCHE Consulting, dass aktuell 90 % aller Unternehmen in der Baumaschinenindustrie davon ausgehen, dass CO₂ Regulierungen einen erheblichen Einfluss auf das zukünftige Geschäft haben werden (vgl. Porsche Consulting, 2021, S. 7). Städte, Kommunen und regionale Behörden werden die Emissionsanforderungen bei öffentlichen Bauprojekten vorgeben. Die Stadt Oslo schreibt bspw. vor, ab 2025 alle staatlichen und ab 2030 auch alle weiteren Baustellen emissionsfrei zu betreiben (vgl. Bellona Europa, 2021).

Während die bisherigen Abgasgrenzwerte, wie bspw. in der Stage-V Verordnung der EU definiert bzw. in ähnlichen Normen wie Tier 4 in den USA noch mit einer Nachbehandlung der Abgase in konventionellen Verbrennungsmotoren erreicht werden können, müssen zur Erreichung der Netto-Null Emissionen innovative Alternativen entwickelt bzw. eingesetzt werden. Dabei ist klar, die eine, optimale Antriebs-Technologie der Zukunft kann und wird es in der Baubranche aufgrund der großen Diversität, sowie der damit einhergehenden geringen Stückzahlen der Maschinen vorerst nicht geben.

Der gemeinsame Nenner bei einem Großteil der alternativen Antriebskonzepte, sind die eingesetzten E-Motoren. Dabei ist es egal, ob es sich um ein hybrides Fahrzeug handelt oder die Baumaschine über eine Batterie, einer externen Quelle oder durch eine Brennstoffzelle mit Strom versorgt wird. Die daraus resultierenden technologischen Änderungen werden weitestgehend keine Evolution des konventionellen Antriebs sein, sondern revolutionäre und neuartige Systemlösungen.

Hier obliegt es jedoch nicht nur den OEMs, die passenden Konzepte und Schlüsseltechnologien zu identifizieren, sondern auch Tier 1 und Tier 2 Lieferanten mit den passenden Kernkompetenzen und Systemverständnis, wie z. B. auch Schaeffler, werden aufzeigen, welche Konzepte umsetzbar und sinnvoll sind.

Um möglichst schnell Effekte bei der Reduzierung der CO₂-Emissionen zu erzielen, empfiehlt es sich zunächst zu untersuchen, welche Baumaschinen den größten Emissionsanteil in der Branche haben.

Laut McKinsey produziert das Bauwesen entlang der gesamten Wertschöpfungskette 13,7 Gt CO₂-Äquivalente (CO₂e). Hierbei wird zusätzlich zum eigentlichen CO₂-Ausstoß das globale Erwärmungspotential anderer Treibhausgase in CO₂-Einheiten umgerechnet und in die Betrachtung mit aufgenommen. Von den 13,7 Gt kommen 2 %, ca. 280 Mt CO₂e, von allen Baumaschinen im Betrieb. Damit sind Baumaschinen bei einem jährlichen Gesamtausstoß von 54,2 Gt CO₂e für 0,5 % der globalen CO₂e Emissionen verantwortlich (Abbildung 2) (vgl. McKinsey, 2021).

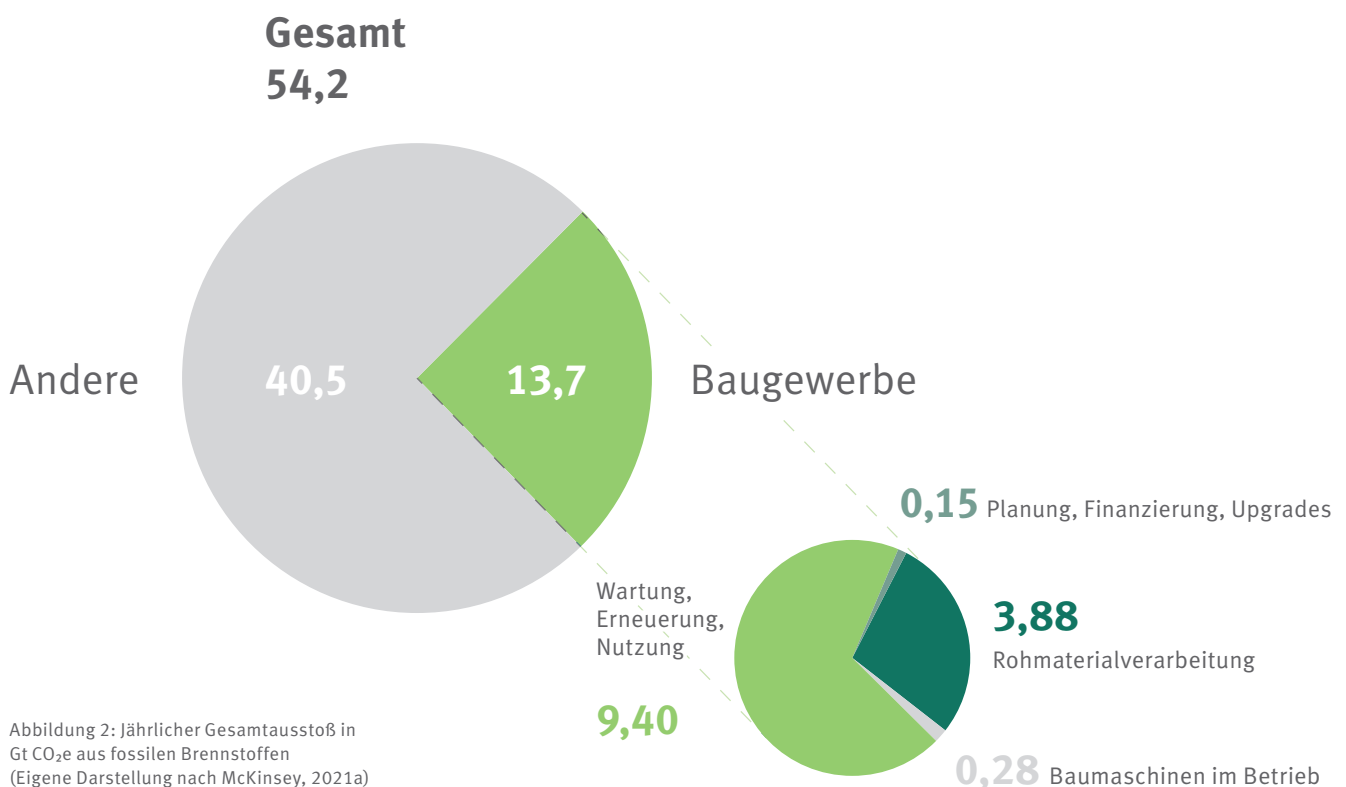


Abbildung 2: Jährlicher Gesamtausstoß in Gt CO₂e aus fossilen Brennstoffen (Eigene Darstellung nach McKinsey, 2021a)

Bei Betrachtung der CO₂-Emissionen der Baumaschinen machen Bagger und Radlader mit 45 % respektive 18 % den größten Anteil aus. (Vergleiche Abbildung 3).

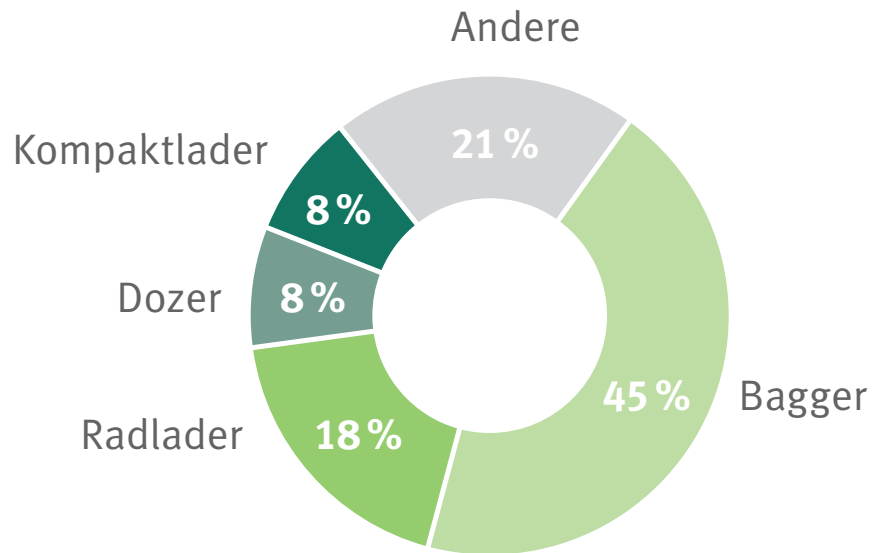


Abbildung 3: Globale CO₂-Emissionen der Baumaschinen (Eigene Darstellung nach Danfoss, 2021)

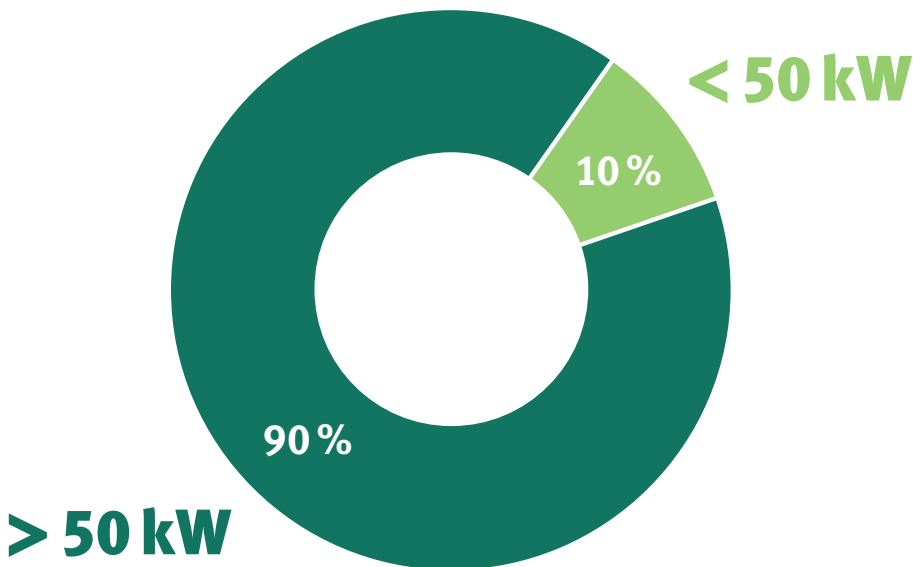


Abbildung 4: CO₂-Emissionen nach Maschinengröße (Eigene Darstellung nach Danfoss, 2021)

Ein näherer Blick auf den CO₂-Ausstoß nach Maschinengröße zeigt einen Anteil von 90 % bei Fahrzeugen größer als 50 kW Leistung (siehe Abbildung 4).

Der Anteil an Baumaschinen kleiner als 50 kW beträgt mit ca. 430.000 Einheiten in etwa 37 % der jährlich zugelassen Baumaschinen (vgl. KGP, 2021). Diese verursachen jedoch nur 10 % der Emissionen.

Es verwundert, dass aktuell gerade im Segment der kompakten Baumaschinen alternative Antriebe angeboten werden, zumal der Prozentsatz am gesamten CO₂-Ausstoß der Baumaschinenbranche sehr gering ist.

Wacker Neuson hat beispielsweise bereits einen vollelektrischen Minibagger (vgl. WackerNeuson, 2021a), zwei Dumper (vgl. WackerNeuson, 2021b; vgl. WackerNeuson, 2021c) sowie einen Radlader (vgl. WackerNeuson, 2021d) im Portfolio. Volvo CE präsentierte neben den beiden bereits erhältlichen, vollelektrischen Maschinen – Kompaktbagger ECR25 und Kompaktradlader L25 – einen weiteren Radlader sowie zwei Kompaktbagger (vgl. Volvo CE, 2021a).

Dass aktuell vorwiegend Maschinen mit weniger als 50 kW Leistung elektrifiziert werden, lässt sich nicht ausschließlich auf die Reduktion der CO₂-Emissionen zurückführen, sondern auch auf pragmatische Time-to-Market-Überlegungen.

- Zum einen eignen sich Kompaktmaschinen hervorragend zum rein batterieelektrischen Betrieb, da sie wenig Leistungsbedarf haben und normalerweise nicht mehr als 4 Betriebsstunden pro Tag im Einsatz sind.
- Zum anderen lässt sich bei den Kompaktmaschinen der Verbrennungsmotor relativ einfach durch einen Elektromotor ersetzen. Die entsprechende Batterie kann durch die eher geringen täglichen Betriebszeiten angemessen groß dimensioniert und leicht im Fahrzeug integriert werden. Der übrige Antriebsstrang bleibt unverändert und kann direkt übernommen werden.
- Zudem finden sich im Bereich der kompakten Maschinen bereits einige, erfolgreich industrialisierte E-Motoren, die aus anderen Anwendungen, z. B. Gegengewichtsstaplern, übernommen und damit Skaleneffekte genutzt werden können.
- Neben den betriebswirtschaftlichen Aspekten spielt auch der Einsatzbereich eine entscheidende Rolle für die Elektrifizierung der kompakten Maschinen. So werden sie v. a. indoor oder im innerstädtischen Bereich genutzt. Eine Verbesserung der Luftqualität, lokale Reduktion der CO₂-Emissionen sowie geringere Geräuschbelastungen sind hier besonders wichtig.



Bild ist Eigentum von Volvo Construction Equipment – © 2001 – 2022 Volvo Construction Equipment – Alle Rechte vorbehalten

In Abbildung 5 ist eine Übersicht der elektrifizierten Bagger kleiner als 50 kW inkl. des jeweiligen Entwicklungsstadiums zu finden.

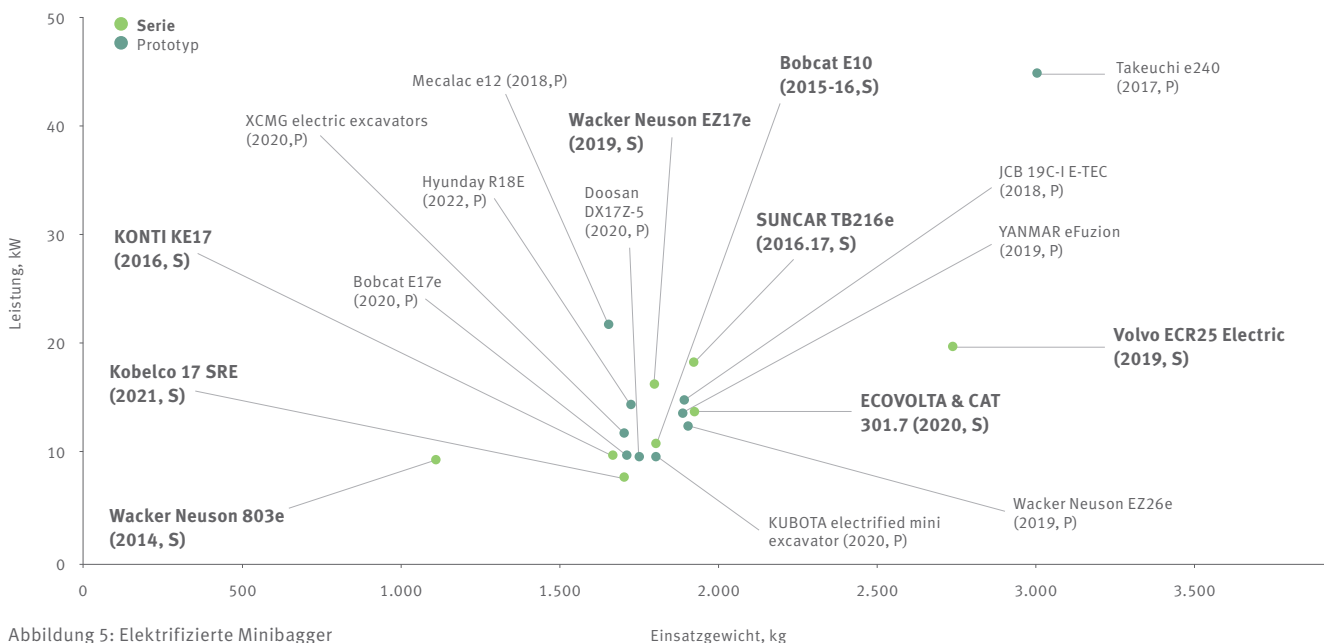


Abbildung 5: Elektrifizierte Minibagger

Einsatzgewicht, kg

In einer Studie aus dem Jahr 2020 sieht McKinsey den Anteil der rein batterieelektrisch angetriebenen Baumaschinen im Kompaktbereich in den nächsten 10 Jahren bei 15 % – 30 %, bei größeren, energieintensiveren Maschinen mit bis zu 150 kW Leistung und 10 Betriebsstunden hingegen bei nur 5 % – 15 % (vgl. McKinsey, 2020).

Für leistungsstärkere Maschinen größer als 150 kW und mit mehr als 10 Betriebsstunden ist jedoch die Brennstoffzelle besser geeignet. Verglichen zu einem Ladezyklus einer Batterie kann Wasserstoff für die Brennstoffzelle schneller

nachgetankt werden. Zusätzlich ist die Leistungsdichte einer Brennstoffzelle zum aktuellen Zeitpunkt höher als bei einer Batterie (vgl. McKinsey, 2021b).

Auch STM Stieler sieht für die nächsten Jahre einen ähnlichen Zuwachs der batterieelektrischen Baumaschinen. Zusätzlich wird auch bei Hybrid-Fahrzeugen ein Wachstum in ähnlicher Größenordnung prognostiziert (vgl. STM Stieler, 2018).

Knibb, Gormezano and Partners (KGP), ein englisches Beratungsunternehmen mit Fokus auf den Offroad-Sektor, hingegen erachtet den rein elektrischen

Antrieb bei Baumaschinen in Nischenanwendungen als sinnvoll. Bei über 50 kW werden sich vor allem sogenannte Hybrid-Lösungen etablieren. Die Brennstoffzelle wird als eher ungeeignet betrachtet (vgl. KGP, 2021).

Dem gegenüber sieht JCB die Brennstoffzelle und Wasserstoffverbrennung als Antriebe der Zukunft. JCB Chairman Lord Bamford verkündete, dass sie weiterhin in die Brennstoffzelle investieren werden, denn die batterieelektrischen Antriebe sind laut JCB keine Allround-Lösung und werden sich nur im kleineren Leistungsbereich etablieren (vgl. Stone, 2021).

Nach fundierter Analyse dieser Studien geht Schaeffler von einer zukünftigen Verteilung von 70 % Verbrennungsmotoren, 15 % Hybriden und 15 % batterieelektrischen Antrieben in 2030 aus (Abbildung 6).

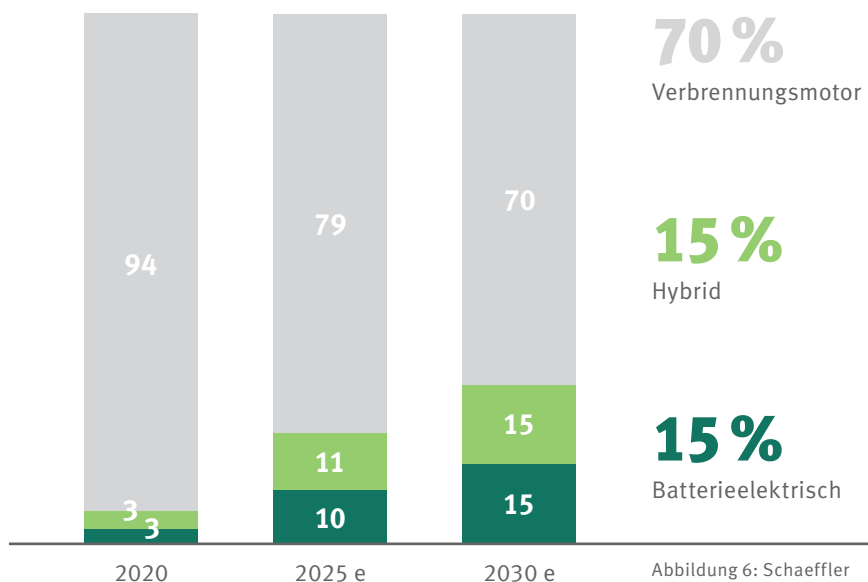


Abbildung 6: Schaeffler Szenario für elektrifizierte Baumaschinen

Auch leistungsstarke Baumaschinen (größer als 50 kW) werden laut Schaeffler eine wichtige Rolle bei der Elektrifizierung einnehmen.

So haben einige Baumaschinenhersteller nicht nur elektrifizierte Kompaktmaschinen im Portfolio, sondern entwickeln bereits seit mehreren Jahren an größeren elektrifizierten Fahrzeugen.

Auf der Bauma 2020 in China hat z. B. Volvo Construction Equipment zwei batterieelektrische Raupenbagger vorgestellt – eine 5,5 t sowie eine 22 t Maschine. Beide Entwicklungen befinden sich derzeit bei ausgewählten Kunden im Feldtest (vgl. Volvo CE, 2021b).

Auch Komatsu hat mit dem Batterielieferanten Proterra Inc. eine Kooperation unterzeichnet, um ab 2023 leistungsstarke, batterieelektrische Bagger in Serie zu bringen (vgl. Proterra, 2021).

Als Tier 1 in der E-Mobilität ist auch Schaeffler seit mehreren Jahren mit einigen OEMs in intensiven Entwicklungsgesprächen. Diskutiert werden u. a. kleine bis große Radlader bei einem bekannten deutschen Baumaschinenhersteller, große Radlader und Hauler bei einem US-Hersteller sowie elektrische Antriebslösungen bei Schaufelladern eines Herstellers aus UK.

Elektrische Subsysteme und Komponenten

Bei Betrachtung der elektrifizierten Subsysteme und Komponenten belief sich der Weltmarkt laut Experten von Interact Analysis in 2020 auf 9 Mrd. € und wird bis 2030 mit einem CAGR von 8% auf über 21 Mrd. € ansteigen.

Dabei sind laut Interact Analysis die größten Herausforderungen (Quelle Interact):

- geringe Skaleneffekte durch stark variierende Fahrzeuggrößen,
- unterschiedlicher Strombedarf,
- verschiedenste Arbeitszyklen,
- fehlende Ladeinfrastruktur und
- hohe Down-Times während der Ladezeiten.

Bei Betrachtung der einzelnen Subsysteme in einer mobilen Arbeitsmaschine, bieten laut Interact Analysis Batterien, Inverter und Motoren die größten Umsatzpotentiale (Abbildung 7).

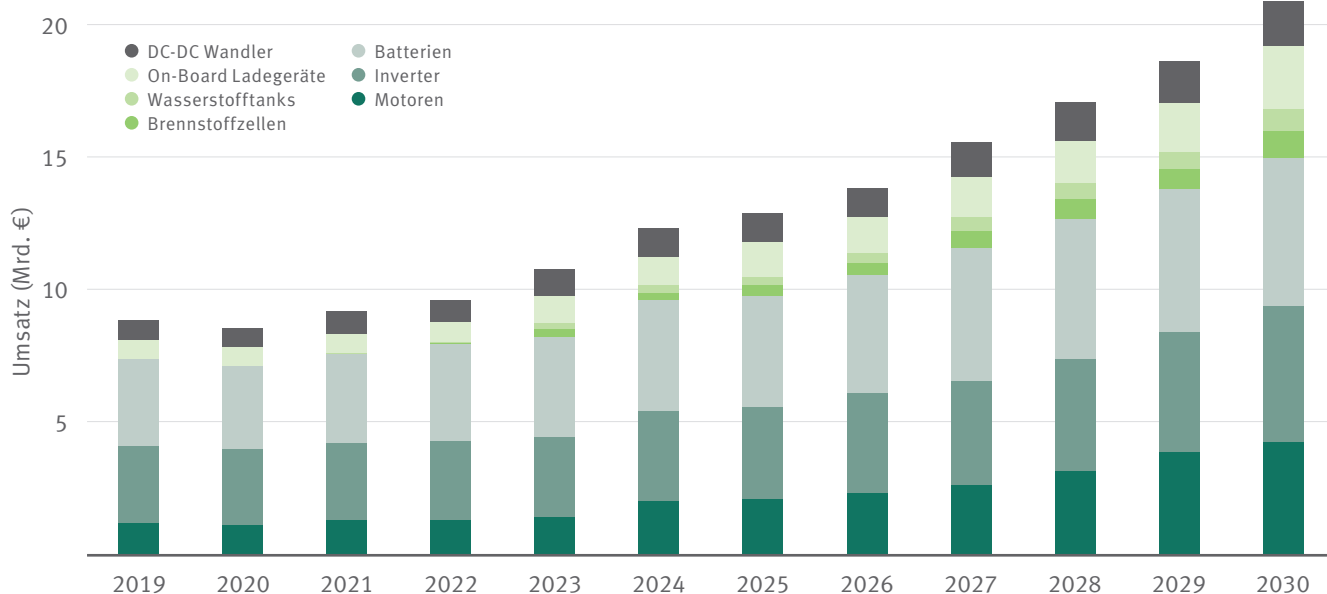


Abbildung 7: Globaler Markt für elektrifiziertes Offroad Equipment nach Komponenten (Eigene Darstellung nach Hayfield, 2021)

Die Gabelstapler werden laut dieser Analyse bei der Elektrifizierung weiterhin führend sein. Es wird davon ausgegangen, dass im Jahr 2030 weiterhin 50% der Komponenten für elektrifizierte Offroad Maschinen in Gabelstapler eingesetzt werden. Darüber hinaus wird

der Anteil an elektrischen Lösungen speziell für Bagger, Traktoren und Radlader auf über 30% ansteigen. Damit werden in 2030 diese vier Offroad-Bauarten mehr als 80% des Komponentenmarktes für E-Mobilität ausmachen (Abbildung 8).

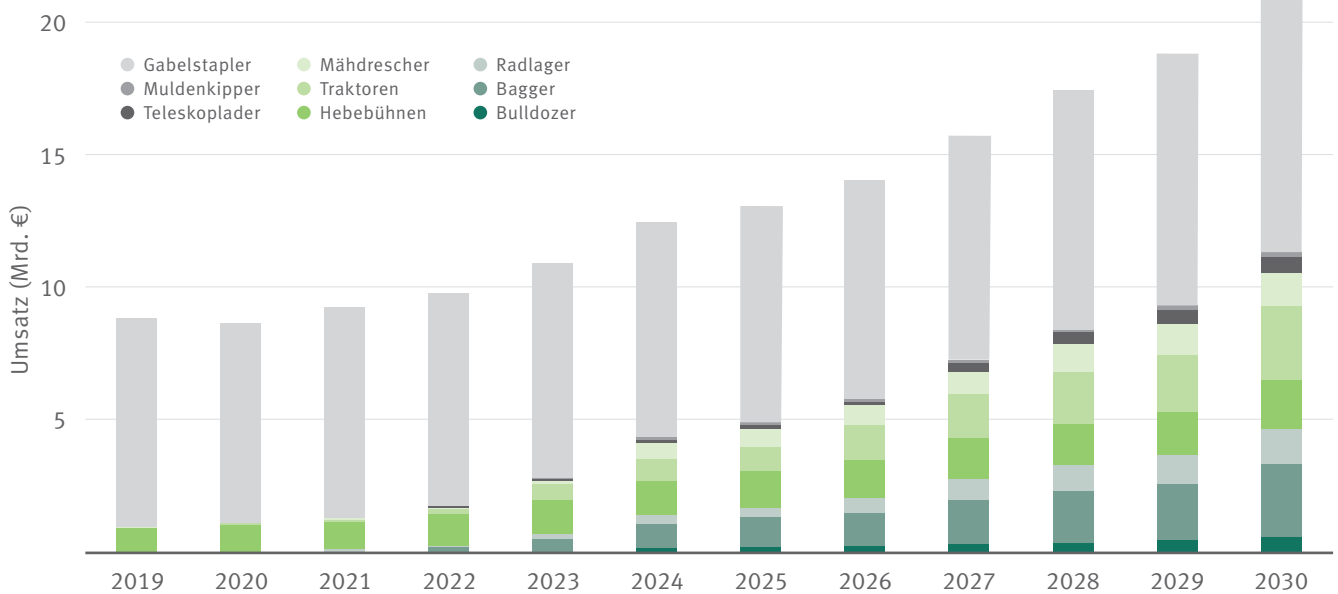


Abbildung 8: Globaler Markt für elektrifiziertes Offroad Equipment nach Fahrzeuganwendung (Eigene Darstellung nach Hayfield, 2021)

Regional wird sich der Fokus der Elektrifizierung von Europa und Amerika nach Asien/Pazifik und China verlagern. Vor allem China wird mit einem deutlichen Anstieg an elektrifizierten Offroad Fahrzeugen ein Treiber der E-Mobilität sein (vgl. Hayfield, 2021).

Mit der Erfahrung aus Projekten und Initiativen der letzten Monate ist Schaeffler der Ansicht, dass die Elektrifizierung der Baumaschinen in den kommenden Jahren sowohl bei den kompakten als auch bei den größeren Maschinen ein beschleunigtes Wachstum erfahren wird. Dafür spricht auch eine zu erwartende, schrittweise Verschärfung der gesetzlichen Rahmenbedingungen.

Von der 26. UN World Climate Conference in Glasgow vom 31.10.2021 bis 12.11.2021 (vgl. UN Climate Change Conference UK 2021, 2021) werden weitere richtungweisende Impulse erwartet.

Elektrische Antriebskonzepte

Die Entwicklung der Antriebskonzepte unterliegt momentan einer großen Dynamik. Verschiedenste Ansätze werden in immer kürzeren Intervallen am Markt präsentiert. Welche sich schlussendlich als Best Practice durchsetzen werden, ist abhängig vom technologischen Fortschritt, der notwendigen Infrastruktur sowie staatlichen Förderungen, welche Kosten-/ Nutzenbetrachtungen beeinflussen werden.

Unabhängig davon, ob batterieelektrische Antriebe bzw. die Brennstoffzelle verwendet werden, können verschiedene Architekturen identifiziert werden.

Wie bei den kompakten Maschinen kann der Verbrennungsmotor gegen einen gleichwertigen E-Motor ausgetauscht werden, was beispielhaft für einen Radlader in Abbildung 9 dargestellt ist. Vorteil ist hierbei eine einfache Umsetzung ohne großen konstruktiven Mehraufwand. Zusätzlich wird ein zweiter E-Motor für die Arbeitsfunktionen eingesetzt.

Den Dieselmotor durch zwei kleinere E-Motoren für den Fahrtrieb sowie einen dritten für die Arbeitsfunktion zu ersetzen, ist ein weiteres mögliches Konzept. Zusammen treiben zwei

Motoren das Getriebe an und bringen damit die geforderte Gesamtleistung für den Antrieb. Die Vorteile liegen in der geringeren Wärmeentwicklung und der besseren Skalierbarkeit. Grenzen bilden die Robustheit des Getriebes, sowie die steigenden Kosten. Denn für jeden zusätzlichen Motor wird ein weiterer Umrichter benötigt und die Steuerungssoftware wird komplexer.

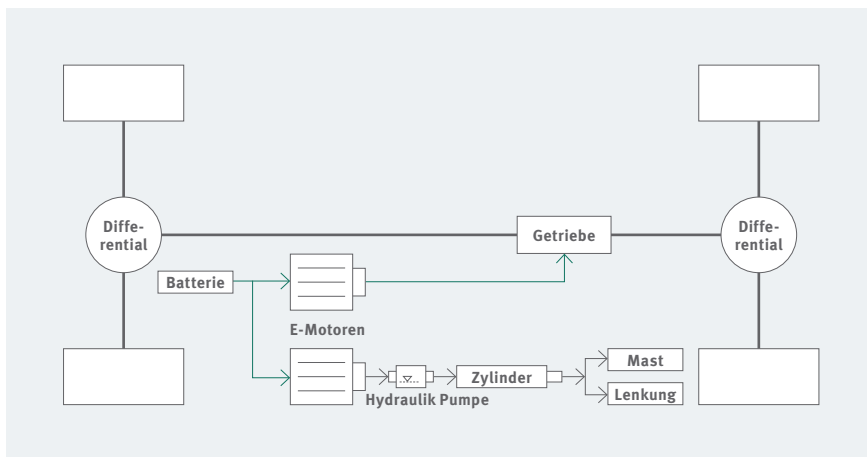


Abbildung 9: Elektrifizierung eines Radladers unter Beibehaltung des konventionellen Antriebsstranges

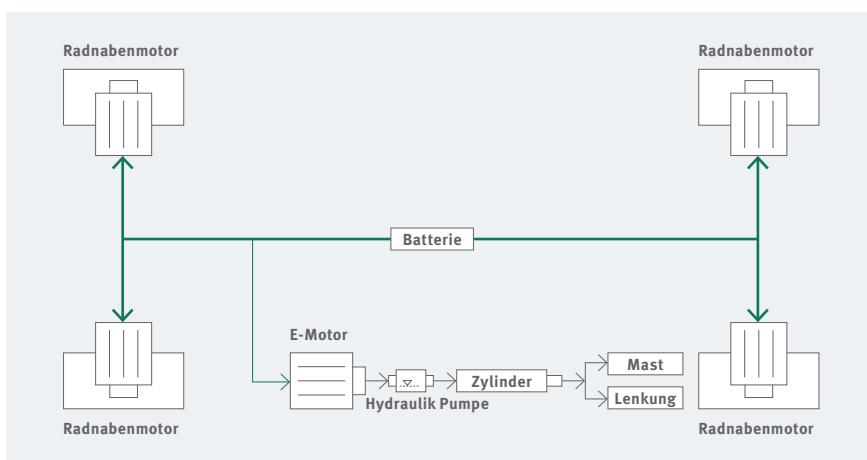


Abbildung 10: Elektrifizierung eines Radladers mit Radnabenmotoren

Ein anderes Konzept zur Trennung der Arbeits- sowie Fahrfunktionen ist die Verwendung von Radnabenmotoren. Hier werden für den Antrieb vier separate Motoren in den Radnaben eingesetzt. Der E-Motor für die Arbeitsfunktionen ist dementsprechend klein dimensioniert, siehe Abbildung 10.



Abbildung 11: Power Wheel

Diese Radnabenantriebe werden bei Schaeffler unter dem Namen Power Wheel entwickelt (Abbildung 11). Eine zusätzliche Integration der Lenkung in die Räder ermöglicht darüber hinaus völlig neue Ansätze in der Mobilität.

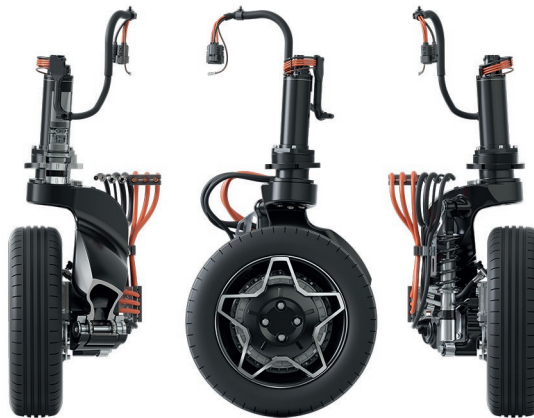


Abbildung 12: Radmodul von Schaeffler

Das Radmodul von Schaeffler (Abbildung 12) bietet sowohl Antrieb als auch Lenkung in den einzelnen Rädern und ermöglicht mit einem Lenkwinkel von 90° das Wenden auf der Stelle. Das ist bei engen Baustellen ein entscheidender Vorteil.

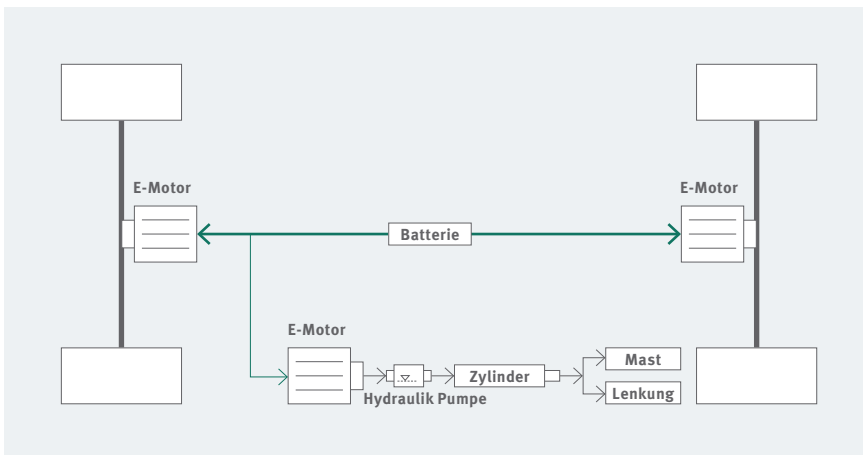


Abbildung 13: Elektrifizierung eines Radladers mit E-Achsen Antrieben

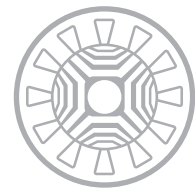
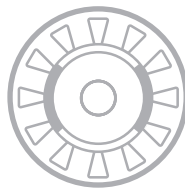
Beim vierten Konzept, siehe Abbildung 13, handelt es sich um die sogenannten E-Achsen. Hierbei wird wie beim vorher beschriebenen Konzept weitestgehend auf den Antriebsstrang verzichtet. Die Elektromotoren werden direkt in die Vorder- und Hinterachse integriert. Auch in diesem Konzept kann ein konventioneller Motor durch zwei kleiner dimensionierte, effizientere E-Motoren ersetzt werden. Ein zusätzlicher, dritter E-Motor wird für die Arbeitsfunktionen verwendet.

Aufgrund der unterschiedlichen Anforderungen an die Leistung der Baumaschinen geht Schaeffler davon aus, dass es für alle Konzepte Anwendungsfälle geben wird.

E-Motoren

Unabhängig davon, welches Konzept der Elektrifizierung sich durchsetzt, wird immer mindestens ein Elektromotor benötigt. Am Beispiel des elektrifizierten Radladers unter Beibehaltung des konventionellen Antriebsstranges werden im Folgenden die notwendigen Eigenschaften des E-Motors für mobile Maschinen betrachtet (vgl. Lajunen et al., 2018, S.10 f).

- Effiziente Kühlung
- Kompaktheit (Torque-to-weight Ratio)
- Hohes Drehmoment
- Hohe Energieeffizienz über einen breiten Betriebsbereich
- Geringe Kosten



Permanenterregter Synchronmotor (PSM)

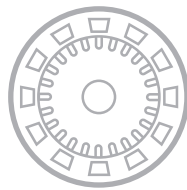
Synchron-Reluktanz Motor (SRM)

Felderregung Rotor	Permanentmagnet	Reluktanz
Drehmomentdichte im Grundstellbereich	Sehr hoch	Niedrig
Leistungsabfall im Feldschwächebereich	Hoch	Sehr niedrig
Maximaler Wirkungsgrad	Sehr hoch	Mittel
Zykluswirkungsgrad	Mittel	Mittel
Vorteile	Hohe Effizienz, Hohe Drehmomentdichte	Einfacher Aufbau, geringer Leistungsabfall im Feldschwächebereich
Nachteile	Magnetfixierung gegen Fliehkraft, Entmagnetisierungsgefahr, Kurzschlussverhalten, Schleppmomente durch induzierte Spannung	Geringe Drehmomentdichte, Geräuschentwicklung, Drehmomentwelligkeit

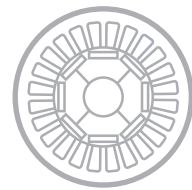
Tabelle 1: Eigenschaften der gängigen E-Motorentypen



**Fremderregter
Synchronmotor (FSM)**



**Asynchronmotor
(ASM)**



**PSM mit vergrabenen
Magneten (IPM)**

Erregerspulen + Reluktanz	Kurzschlusskäfig	Permanentmagnet + Reluktanz
Hoch, sofern Übertrager im gleichen Bau- raum darstellbar ist	Mittel	Hoch
Sehr niedrig	Hoch	Mittel
Mittel	Niedrig	Hoch
Sehr hoch	Hoch	Hoch
Hohe Effizienz im Feldschwächebereich, flexible Steuerung des Rotorflusses, kein Schleppmoment, sicherer Zustand unbestromt (Entkopplung), Magnetpreisunabhängigkeit	Kein Schleppmoment, sicherer Zustand unbestromt, Magnetpreisunabhängigkeit	Ausgewogene Eigenschaften, Bester Kompromiss
Übertrager (Bauraum, Lebensdauer), Entwärmung Rotor, Unwucht, Zusatzschaltung im Inverter für Rotorerregung erforderlich	Geringe Effizienz, komplexe Regelbarkeit, Entwärmung Rotor	Kurzschlussverhalten, Schleppmomente durch induzierte Spannung

Bei Baumaschinen ist der Einsatz von Permanent-erregten Synchronmotoren (PSM), Synchron Reluktanz-Motoren (SRM), Fremderregten Synchronmotoren (FSM), Asynchronmotoren (ASM) und Permanent-erregten Synchronmotoren mit vergrabenen Magneten (IPM – Interior Permanent Magnet Synchronous Motor) denkbar. Die jeweiligen Wirkungsweisen, Eigenschaften und die damit verbundenen Vor- und Nachteile sind in Tabelle 1 dargestellt.

Der Großteil der in Zukunft eingesetzten E-Motoren wird nach Interact Analysis der PSM sein (vgl. Hayfield, 2021). Der PSM erfüllt die eingangs erwähnten Anforderungen an E-Motoren für Baumaschinen, da er u. a. eine hohe Effizienz- und sehr hohe Drehmomentdichte im Grundstellbereich aufweist. Nachteile sind die Sicherung der Permanentmagnete gegen die Fliehkraft, die Entmagnetisierungsgefahr, Kurzschlussverhalten und die Schleppmomente durch induzierte Spannungen.

Der SRM hat einen einfachen Aufbau und der Leistungsabfall im Feldschwächebereich ist im Gegensatz zum PSM sehr niedrig. Negativ sind die geringe Drehmomentdichte im Grundstellbereich und ein schlechtes Verhalten in der Geräuschentwicklung sowie der Drehmomentwelligkeit. Der Maximalwirkungsgrad ist vergleichsweise mittelmäßig.

Beim FSM ist die Drehmomentdichte im Grundstellbereich hoch, sofern der Übertrager im Bauraum darstellbar ist. Der Leistungsabfall im Feldschwächebereich ist sehr niedrig. Jedoch benötigt der Übertrager einen relativ großen Bauraum und hat nur eine begrenzte Lebensdauer. Der Rotor benötigt außerdem eine Zusatzschaltung im Inverter zur Regelung. Der Gesamtwirkungsgrad des FSM ist nur mittel.

Der ASM hat nur eine mittlere Drehmomentdichte im Grundstellbereich, der Leistungsabfall im Schwächebereich ist hoch und der maximale Wirkungsgrad ist niedrig. Zwar existiert kein Schleppmoment und der Motor ist magnetpreisunabhängig, die nachteiligen Eigenschaften überwiegen jedoch.

Schaeffler konzentriert sich daher bei der Motorentwicklung auf den IPM. Der IPM kombiniert die Stärken des PSM mit den Vorteilen des Reluktanzeffekts. Dadurch reduziert sich der Leistungsabfall im Feldschwächebereich und es entsteht ein Motor mit ausgewogenen Eigenschaften. Die Permanentmagneten müssen nicht mehr gesichert werden, da sie im Motor vergraben werden.

Dabei kommen bei Schaeffler unterschiedliche Wicklungsverfahren zum Einsatz. Diese Technologien sowie die damit verbundenen Eigenschaften sind in Abbildung 14 zu finden.

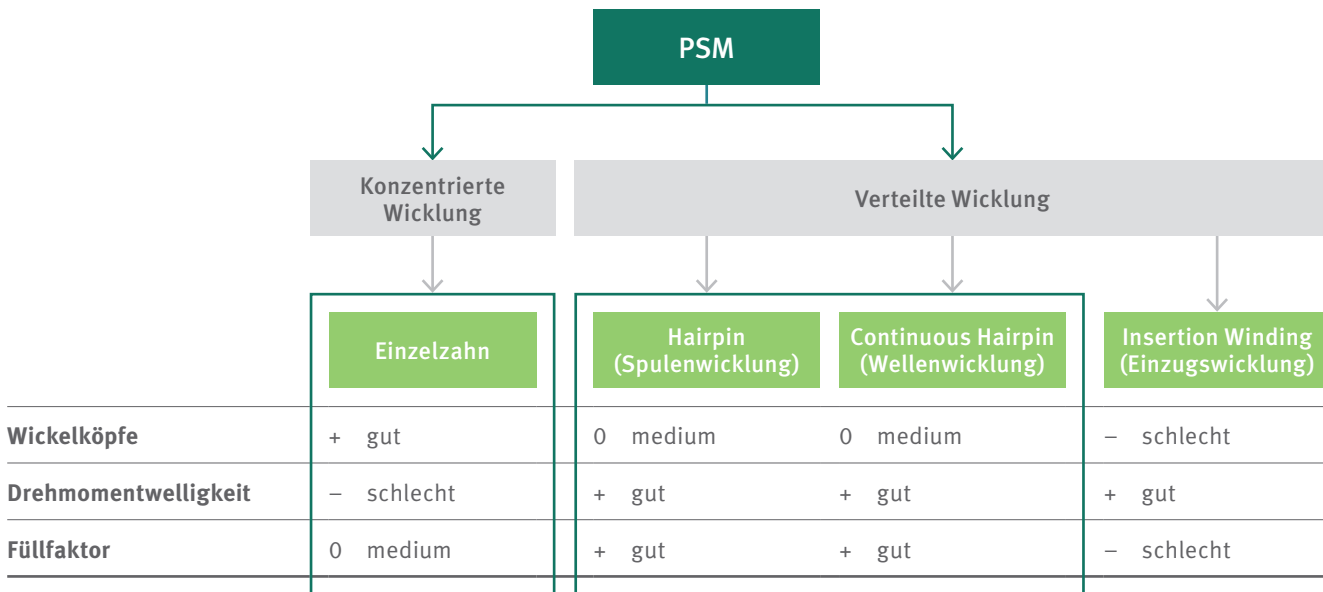


Abbildung 14: Wicklungstechnologien bei Permanent Synchronmotoren

Wälzlagertechnik

Neben dem Einsatz von alternativen Antrieben kann auch bei konventionell betriebenen, mobilen Arbeitsmaschinen noch ein großer Anteil an Treibhausgasen eingespart und GHG Emissionen reduziert werden.

Dabei werden Maßnahmen gegen den Klimawandel entlang der kompletten Wertschöpfungskette ergriffen. So bietet sich ein zirkulärer Ansatz an, bei dem Abfallprodukte und der Verbrauch von Rohmaterialien minimiert werden können.

Eine Veränderung des Produktions- und Konsumverhaltens ist essenziell für Nachhaltigkeit. Ein Rohmaterial darf nicht mehr nur in der Produktionskette verarbeitet und nach der Nutzung entsorgt werden. Vielmehr ist es wichtig, diese Produkte und Materialien zurück in den Kreislauf zu führen. Ziel ist es, Maschinen zu produzieren, welche erneuerbare Energien effizient nutzen, bei der Produktion keine Abfallprodukte hinterlassen und maximale Betriebszeiten und Lebensdauer aufweisen

(vgl. Wordsworth, S. 2021. Keys to a carbon neutral future (and it's not just electromobility). lvtinternational.com).



Abbildung 15: Zirkulärer Ansatz zur Nachhaltigkeit (Eigene Darstellung nach Wordsworth, S. 2021. Keys to a carbon neutral future (and it's not just electromobility). lvtinternational.com)

Signifikante Reduzierungen der CO₂-Emissionen entstehen hierbei durch Innovationen.

Die Dekarbonisierung der Bauindustrie basiert auf vier Säulen:

DEKARBONISIERUNG



Maschinen-Effizienz

Integration optimierter Maschinen-Komponenten und Subsysteme (z. B. Motor, Getriebe, Hydraulik, Wälzlager, ...)



Bedienungs-Effizienz

Professionelle Maschinen-Bediener zur effizienten und effektiven Benutzung der Maschinen



Alternative Energiequellen

Verwendung synthetischer oder biologischer Kraftstoffe, elektrische Antriebe, Wasserstoff, etc.



Prozess-Effizienz

Optimaler Workflow – einschließlich der Auswahl der am besten geeigneten Maschinen und deren Kombination

Abbildung 16: Vier Säulen nachhaltiger Energie-Effizienz für die Bauindustrie (Eigene Darstellung nach CECE, CEMA, 2018, S. 4)

Moderne Maschinen können durch alternative Antriebssysteme und intelligente, „smarte“ Technologien umweltfreundlicher gestaltet werden, aber auch andere Komponenten, wie Wälzlager, können durch Optimierung Treibhausgasemissionen verringern (vgl. CECE, CEMA, 2018, S. 4).

Zulieferer können dabei einen großen Beitrag zur Maschinen-Effizienz leisten, denn Emissionen entstehen unter anderem durch Verlustleistung (Reibung) im gesamten Antriebssystem.

Laut einer Studie von Prof. Dr. Kenneth Holmberg und Dr. Ali Erdemir aus dem Jahr 2017, geht in etwa 1/3 der gesamten, produzierten Energie weltweit durch Reibung verloren. Reibung trägt dadurch nicht nur 8,1 Gt CO₂ zu den globalen Gesamtemissionen bei, sondern verursacht auch Kosten in Höhe von 250 Milliarden Euro (vgl. Holmberg, Erdemir, 2017, S. 271).

Effizientere Arbeitsmaschinen, welche die Leistung von Dieselmotoren optimal ausnutzen, können den Kraftstoffverbrauch senken und dadurch GHG Emissionen deutlich reduzieren.

Schaeffler hat dazu eine Analyse anhand eines Traktors mittlerer Leistungsgröße (83 kW Motorleistung bei einer Nenndrehzahl von 2200 U/min nach ECE R120) durchgeführt. Es wurde der komplette Antriebsstrang des Traktors betrachtet, inklusive der verschiedenen Lastfälle und Betriebszyklen mit und ohne Power-Takeoff.

Die Berechnung der mittleren Systemreibung der Lager im Traktor lieferte ein beeindruckendes Ergebnis: der durchschnittliche Reibungsverlust aller Lagerstellen pro Traktor beträgt mehr als 3%. Eine durchgängige Optimierung der Wälzlagerstellen würde bereits nach den ersten 1.000 Betriebsstunden eine Einsparung von 252 Litern Diesel bzw. 670 kg CO₂ bieten.

Bekanntermaßen sind in Offroad-Anwendungen diverse hydraulischen Aggregate für die Kraftübertragung zuständig.

Verstellbare Axialkolbenpumpen und -motoren sind speziell für den Einsatz von elektrischen Maschinensteuerungen ausgelegt.

Dabei haben reibungsoptimierte Wälzlagerlösungen einen ganz erheblichen Einfluss auf die Verringerung von Verlustleistung, Bauraum und Gewicht.

In enger Zusammenarbeit mit einem renommierten Hydraulikpumpenhersteller hat Schaeffler für die Neuentwicklung von Axialkolbenpumpen und Axialkolbenmotoren zahlreiche Lagerstellen optimiert und setzt hoch-effiziente Lagerlösungen ein.

Einen wesentlichen Anteil daran haben X-life Zylinderrollenlager mit optimiertem Bordkontakt. X-life steht für eXtended life oder höchste Lebensdauer. Die Lager zeichnen sich durch eine optimierte Innenkonstruktion und eine verbesserte Oberflächenstruktur der Laufbahnen aus. Die dynamische Tragzahl ist je nach Bauform bis zu 30% höher als die herkömmlicher Wälzlager.

Die verbesserte Kontaktgeometrie zwischen Rollstirnfläche und Bord minimiert die maximale Flächenpressung. Das ermöglicht die Bildung eines tragfähigen Schmierfilms. Die Rollen gleiten nun bei axialer Belastung auf dem Schmierfilm. Dadurch ist es möglich, die Zylinderrollenlager mit einem Fa/Fr-Verhältnis von 0,6 zu betreiben. Die zulässige Axiallast kann damit 60 Prozent der Radiallast betragen. Bei herkömmlichen Zylinderrollenlagern beträgt dieser Wert lediglich 40%. Gleichzeitig reduziert sich das Reibmoment abhängig von der Höhe der Axiallast um bis zu 50%. Das wirkt sich ebenfalls positiv auf die Lagertemperatur während des Betriebs aus, steigert die Effizienz und spart Energie.

Auch bei den eingesetzten Kegelrollenlagern kommt der Optimierung des Bordkontaktes eine besondere Bedeutung zu. Insbesondere bei zunehmender Axiallast steigt das Reibmoment konventioneller Kegelrollenlager sehr stark an. Schaeffler hat daher bei den X-life-Kegelrollenlagern Geometrie, Oberflächen, Werkstoff sowie Maß- und Laufgenauigkeit überarbeitet. Ergebnis ist die Steigerung der dynamischen Tragzahlen um bis zu 20%, was mit einer Lebensdauererhöhung um bis zu 70% einhergeht. Gleichzeitig reduziert die höhere Maß- und Laufgenauigkeit in Verbindung mit der verbesserten Oberflächentopografie das Reibmoment um bis zu 75% gegenüber handelsüblichen Produkten. Durch die optimierte Reibung wird der Schmierstoff im Lager weniger beansprucht. Dadurch verlängern sich die Schmierstoffgebrauchsdauer und damit die Wartungsintervalle. Alle Anpassungen an der Innenkonstruktion führen insgesamt zu einer deutlichen Geräuschreduzierung der X-life-Kegelrollenlager.

Letztendlich konnte der Gesamtwirkungsgrad der Pumpen und Motoren um jeweils ca. 2% gesteigert und die Systeme damit wesentlich energieeffizienter ausgelegt werden.

In Summe lassen sich bei einem Radlader mit einer neuen Hydraulikpumpe und zwei Hydraulikmotoren bei einer Antriebsleistung von 140 kW rund 9 kW einsparen. Hochgerechnet auf 1.000 Radlader bei acht Stunden Betriebszeit ergibt sich daraus ein jährliches Einsparpotenzial von rund 26.000 MWh. Dies entspricht dem durchschnittlichen jährlichen Energieverbrauch von mehr als 6.500 Drei-Personen-Haushalten. Umgerechnet ergibt sich eine Einsparsumme von etwa 7,5 Millionen Euro (0,30€/kWh) bzw. von ca. 16.000 Tonnen CO₂. Dies wiederum entspricht der jährlichen Emission von 4.200 Autos der Golf-Klasse bei einer Jahresfahrleistung von je 25.000 km.

Neben den Hydraulikaggregaten lassen sich auch wesentliche Effizienzsteigerungen durch anwendungsspezifische Optimierungen in den Getrieben realisieren. Hierbei wird auf das bereits vorgestellte X-life-Design aufgesetzt und mittels der hauseigenen Simulationssoftware Bearinx die Konstruktion der Wälzlager genau auf das Lastkollektiv und die Rahmenbedingung des jeweiligen Getriebes angepasst. Zusätzlich konnte die Rollenprofilierung, der Bordkontakt sowie die Mikrogeometrie der Laufbahnen durch Fortschritte in der Fertigungstechnologie optimiert und dadurch das Kegelrollenlager noch reibungsärmer ausgeführt werden.

So ist es gelungen, die Reibung des 6-Gang Doppelkupplungsgetriebes eines SUVs mit einem Leergewicht von 1.370 kg und einem 120 kW Dieselmotor um 71% im Vergleich zur Standardlösung

zu reduzieren. Konkret bedeutet dies eine Reduktion der CO₂-Emissionen um 3,8 g pro gefahrenen Kilometer. Umgerechnet auf die Gesamtemission des Fahrzeugs entspricht das einer Reduzierung von 2,5%. Der Zusammenhang zwischen der Reibung und den unterschiedlichen Entwicklungsstufen der Kegelrollenlager ist in Abbildung 17 dargestellt:

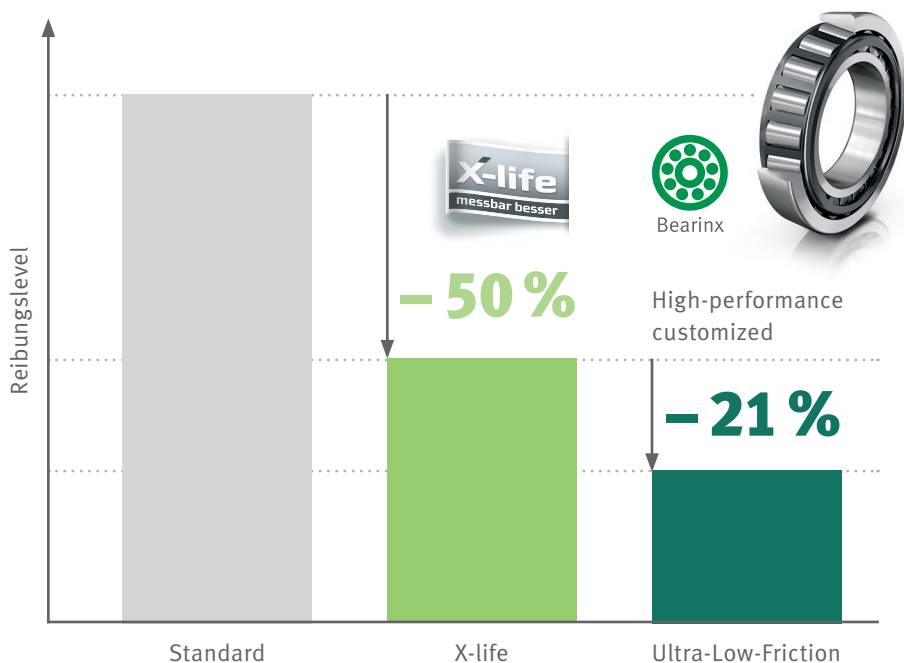


Abbildung 17: Reibungslevel der Kegelrollenlager

Literaturverzeichnis

Holmberg, K. und Erdemir, A. (2017): Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions. In: Friction. Vol. 5 (3). S. 263 – 284.

McKinsey (2021a): Call for action: Seizing the decarbonization opportunity in construction.

Online unter URL: <https://www.mckinsey.de/industries/engineering-construction-and-building-materials/our-insights/call-for-action-seizing-the-decarbonization-opportunity-in-construction> (Abruf 19.10.2021)

United Nations (2018): The World's Cities in 2018.

Online unter URL: https://www.un.org/en/events/citiesday/assets/pdf/the_worlds_cities_in_2018_data_booklet.pdf (Abruf 12.02.2021).

United Nations (2019): Population Facts.

Online unter URL: https://www.un.org/en/development/desa/population/publications/pdf/popfacts/PopFacts_2019-6.pdf (Abruf 12.02.2021).

VDMA (2017): Emissionsgesetzgebung für Mobile Maschinen: EU Stufe V – Fact Sheet.

Online unter URL: https://bub.vdma.org/documents/266753/15008694/1494833760690_2017-05-15_VDMA_EU%20Stufe%20V_Fact%20Sheet_DE.pdf/562d8124-cc59-4cfd-9249-17d7c10ad012 (Abruf 18.06.2021).

United Nations (2021): The Paris Agreement.

Online unter URL: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement> (Abruf 24.06.2021).

Wordsworth, S. (2021): OPINION: Keys to a carbon neutral future (and it's not just electromobility).

Online unter URL: <https://www.ivtinternational.com/opinion/opinion-keys-to-a-carbon-neutral-future-and-its-not-just-electromobility.html> (Abruf 14.10.2021)

Schröder, Dr. Marit (2021): Weltklimarat: Doppelter Weckruf durch den IPCC-Bericht.

Online unter: <https://www.topagrar.com/energie/news/weltklimarat-doppelter-weckruf-durch-ipcc-bericht-12660605.html> (Abruf 05.10.2021).

IPCC (2021): Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [MassonDelmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.

Bellona Europa (2021): Norwegian cities lead the way in reaching zero-emissions in construction sites.

Online unter: <https://bellona.org/news/climate-change/2021-03-norwegian-cities-lead-the-way-in-reaching-zero-emissions-in-construction-sites> (Abruf 05.10.2021).

Danfoss (2021): Leading toward zero-emission construction. (PowerPoint)

KGP (2021): Options for low-carbon mobile machinery. (PowerPoint)

WackerNeuson (2021a): EZ17e – Der erste elektrische Minibagger von Wacker Neuson.

Online unter: <https://www.wackerneuson.ch/de/produkte/zero-emission/ez17e/model/ez17e/> (Abruf 07.10.2021).

WackerNeuson (2021b): DW15e – Der Elektro-Raddumper mit Allrad Antrieb.

Online unter: <https://www.wackerneuson.ch/de/produkte/zero-emission/dw15e/model/dw15e/> (Abruf 07.10.2021).

WackerNeuson (2021c): DT10e – Elektro Dumper.

Online unter: <https://www.wackerneuson.ch/de/produkte/zero-emission/dt10e/model/dt10e/> (Abruf 07.10.2021).

WackerNeuson (2021d): WL20e – Innovativ, elektrisch, emissionsfrei – der Radlader mit Elektroantrieb.

Online unter: <https://www.wackerneuson.de/de/produkte/zero-emission/wl20e/model/wl20e/> (Abruf 07.10.2021).

Volvo CE (2021a): MEHR POWER FÜR IHR BUSINESS.

Online unter: <https://www.volvoce.com/deutschland/de-de/products/electric-machines/add-silence/> (Abruf 07.10.2021).

McKinsey (2020): Offroad follow up. (PowerPoint),

McKinsey (2021b): Offroad (PowerPoint),

STM-Stieler (2018): Future drive technologies for mobile working machines 2020/2025 Construction equipment.

Volvo CE (2021b): VOLVO CE PRESENTS CONNECTIVITY, AUTOMATION AND ELECTROMOBILITY INNOVATIONS AT BAUMA CHINA 2020.

Online unter: <https://www.volvoce.com/global/en/news-and-events/press-releases/2020/bauma-china-2020-press-kit/volvo-ce-presents-connectivity-automation-and-electromobility-innovations-at-bauma-china-2020/> (Abruf 08.10.2021).

Proterra (2021): Komatsu and Proterra Announce New Collaboration to Develop All-Electric Construction Equipment.

Online unter: <https://www.proterra.com/press-release/komatsu-electric-construction-equipment/> (Abruf 08.10.2021).

Hayfield, Alastair (2021): Interact Analysis Projects 150% Growth By 2030 for Off-Highway Electrified Components Market.

Online unter: https://www.oemoffhighway.com/market-analysis/news/21735164/interact-analysis-projects-150-growth-by-2030-for-offhighway-electrified-components-market?utm_source=OOH+Equipment+Market+Outlook+eNL&utm_medium=email&utm_campaign=HCL210923007&o_eid=1651F0081734E6V&rdx.ident%5Bpull%5D=omeda%7C1651F0081734E6V&om_id=1024748005&oly_enc_id=1651F0081734E6V (Abruf 08.10.2021).

Stone, Tom (2021): Boris Johnson attends JCB unveiling as firm announces £100m hydrogen-engine investment.

Online unter: <https://www.ivtinternational.com/news/engines/boris-johnson-attends-jcb-unveiling-as-firm-announces-100m-hydrogen-engine-investment.html>. (Abruf 25.10.2021).

UN Climate Change Conference UK 2021 (2021): COP26.

Online unter: <https://ukcop26.org/>. (Abruf 25.10.2021).

Lajunen, Antti; Sainio, Panu; Laurila, Lasse; Pippuri-Mäkeläinen, Jenni; Tammi, Kari (2018): Overview of Powertrain Electrification and Future Scenarios for Non-Road Mobile Machinery. In: *Energies*, 2018, 11, 1184.

Porsche Consulting (2021): The Future of Construction Machinery Manufacturers. Ecosystem with a new perspective.

CECE, CEMA (2018): CECE and CEMA Optimising our industry 2 reduce emissions.

Online unter <https://www.cece.eu/stream/cececo2booklet-1.3.pdf> (Abruf 25.10.2021).

Schaeffler Technologies AG & Co. KG

Industriestraße 1 – 3
91074 Herzogenaurach
www.schaeffler.de
info@schaeffler.com

In Deutschland:
Telefon 0180 5003872
Aus anderen Ländern:
Telefon +49 9132 82-0

Alle Angaben wurden sorgfältig erstellt und überprüft. Für eventuelle Fehler oder Unvollständigkeiten können wir jedoch keine Haftung übernehmen. Technische Änderungen behalten wir uns vor.
© Schaeffler Technologies AG & Co. KG
Ausgabe: 2022, Juli
Nachdruck, auch auszugsweise, nur mit unserer Genehmigung.