

Motoren und Getriebe bei Traktoren

Roger Stirnimann, Christian Birkmann, Karl Theodor Renius

Kurzfassung

Bei klassischen Dieselmotoren für Traktoren gab es im Berichtszeitraum keine wesentlichen Neuheiten. Seit Frühjahr 2024 stehen die Emissionsgrenzwerte und Prüfanforderungen der EU-Abgasnorm EURO 7 für Straßenfahrzeuge fest. Ob daraus längerfristig eine neue Abgasstufe für Nonroad-Fahrzeuge abgeleitet wird, ist noch offen. Weiterhin viele Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten gibt es bei H₂-Verbrennungsmotoren und H₂-Tankkonzepten. Weichai Lovol gab weitere Information zu dem bereits im letzten Jahr erwähnten leistungsverzweigten Stufenlosgetriebe frei, so dass ein Getriebeplan erstellt werden konnte. Stark vorangetrieben wird auch die Entwicklung von elektrifizierten Antriebssträngen mitsamt Leistungselektronik. Die hohen Herstellkosten und Komponentengewichte sowie die geringe Energiedichte von Energiespeichern verhinderten bisher eine nennenswerte Marktdurchdringung.

Schlüsselwörter

Abgasnormen, H₂-Verbrennungsmotor Dual-Fuel, Elektrische Antriebstechnik, Wechselrichter

Tractor Engines and Transmissions

Roger Stirnimann, Christian Birkmann, Karl Theodor Renius

Abstract

There were no significant innovations in conventional diesel engines for tractors in the reporting period. The emission limits and test requirements of the EU EURO 7 emissions standard for road vehicles have been in place since spring 2024. It remains to be seen whether a new emissions standard for non-road vehicles will be derived from this in the longer term. H₂ combustion engines and H₂ refueling concepts continue to be the subject of much research and development activity. Weichai Lovol released further information on the power-split CVT mentioned last year, so that a transmission scheme could be drawn up. The development of electrified drivetrains including power electronics is also being driven forward. However, the high manufacturing costs and component weights as well as the low energy density of energy storage systems have so far prevented significant market penetration.

Keywords

Emission standards, H₂ dual-fuel combustion engine, electric drive technology, inverters

Verbrennungsmotoren

Bei klassischen Dieselmotoren gab es im Berichtszeitraum keine Neuheiten oder Weiterentwicklungen, die in diesem Kapitel nicht schon erwähnt wurden. Die in den letztjährigen Jahrbuch-Ausgaben aufgezeigten Trends bei Motor- und Abgastechnologien gelten weiterhin.

Mit der EU-Verordnung 2024/1257 stehen seit Frühjahr 2024 die Emissionsgrenzwerte und Prüfanforderungen der Abgasnorm EURO 7 für Straßenfahrzeuge fest [1]. Abgelöst werden damit die Normen EURO 6/VI, die mittlerweile seit mehr als zehn Jahren in Kraft sind und mit den Buchstabenzusätzen "b", "c", "d" und "e" laufend verschärft wurden (v.a. betreffend Testbedingungen). Für die Inverkehrsetzung von PKW und leichten Nutzfahrzeugen soll EURO 7 ab Ende November 2027 gelten, für schwere Nutzfahrzeuge ab Ende Mai 2029.

Mit EURO 7 werden die Abgasvorschriften für die oben genannten Fahrzeugkategorien erstmals in einer einzigen Verordnung zusammengefasst. Die bisherige Unterscheidung bei den Normenbezeichnungen mit arabischen resp. römischen Zahlen entfällt damit [2].

Die wichtigsten Änderungen, die mit EURO 7 bei Fahrzeugen > 3,5 t einhergehen, sind:

- Harmonisierung der Grenzwerte für die beiden Zyklen "World Harmonized Stationary Cycle" (WHSC) und "World Harmonized Transient Cycle" (WHTC)
- Einführung von zusätzlichen Real-Drive-Emission-Grenzwerten (RDE)
- Verschärfung der Grenzwerte für Stickoxide (NO_x) und Kohlenmonoxid (CO)
- Berücksichtigung von Partikeln bis zu einer Grösse von 10 nm bei den Partikelanzahl-Grenzwerten (bisher 23 nm)
- Einführung von gravimetrischen Grenzwerten für Distickstoffmonoxid (N₂O/"Lachgas") und Ammoniak (NH₃)
- Einhaltung von Emissionsgrenzwerten über größere Zeiträume und Kilometerstände
- Berücksichtigung von „Nicht-Abgasemissionen“ (Verdunstungs-, Reifenabrieb- und Bremsemissionen)

Bisher "folgten" die Abgasstufen für Nonroad-Fahrzeuge (1, 2, 3A, 3B, 4 und 5) den EURO-Normen für schwere Nutzfahrzeuge mit einem gewissen Zeitverzug, derzeit gibt es aber noch keine konkreten Informationen über eine Stufe 6 als Pendant zu EURO 7.

Auffallend sind weiterhin die zahlreichen Aktivitäten im Zusammenhang mit H₂-Verbrennungsmotoren. Einige Hersteller scheinen dabei - zumindest als Übergangslösungen - auch Dual-Fuel-Verfahren in Betracht zu ziehen, allerdings weniger für Fahrzeug-, sondern vielmehr für Schiffsanwendungen. Der Wasserstoff wird hier der Ansaugluft beigemischt und mit einer Pilotmenge Diesel im Brennraum gezündet. Damit soll sich einerseits der CO₂-Ausstoss um bis zu 80 % verringern lassen und andererseits bei fehlender H₂-Verfügbarkeit problemlos auf reinen Dieselmotorbetrieb umgeschwenkt werden können [3, 4].

Als Brückentechnologie auf dem Weg zu reinen H₂-Verbrennungsmotoren sieht auch FPT Industrial den im Herbst 2024 vorgestellten Dual-Fuel-Motor N67 Hythane (Prototyp). Dieser

basiert auf dem bekannten 6-Zylinder-Gasmotor mit 6,7 l Hubraum (Otto-Verfahren) und kann sowohl mit gasförmigem als auch flüssigem Methan (CNG resp. LNG) betrieben werden. Der Wasserstoff wird der Ansaugluft über ein zusätzliches Saugrohreinjectionssystem beigemischt, weshalb sich auch bestehende Gasmotoren zu Dual-Fuel-Motoren erweitern lassen. Das Gemisch aus Methan und Wasserstoff soll weder negative Auswirkungen auf den Motor noch auf das Abgasnachbehandlungssystem (3-Wege-Katalysator) haben. Die CO₂-Emissionen sollen sich im Vergleich zum Betrieb mit reinem fossilem Methan (Erdgas) um rund 50 % verringern lassen [5].

Der Zulieferer Bosch arbeitet neben Brennstoffzellen auch an H₂-Verbrennungsmotoren und entwickelt dafür sowohl ein Saugrohr- als auch ein Direkteinspritzsystem. Diese Motoren sollen vor allem für schwere Fahrzeuge geeignet sein, die über längere Zeit mit besonders hohen Lasten unterwegs sind. Weil sich mehr als 90 % der bestehenden Entwicklungs- und Fertigungstechnologien nutzen lassen, sollen H₂-Verbrennungsmotoren zudem einen schnellen und kostengünstigen Einstieg in den mobilen Wasserstoff-Einsatz ermöglichen [6].

Mit Fokus auf Bau- und Agraranwendungen werden H₂-Verbrennungsmotoren auch im Rahmen des Projektes "PoWer" untersucht [7]. Beteiligte Partner sind u.a. Mahle, Deutz AG, CLAAS, Liebherr, die TU Braunschweig und das KIT in Karlsruhe. Genauer betrachtet werden sollen u.a. der H₂-Verbrennungsprozess sowie das Verhalten von Werkstoffen und Abgasnachbehandlungssystemen.

Wasserstoff weist mit 120 MJ/kg einen sehr hohen spezifischen Energiewert (gravimetrische Energiedichte) auf, wegen den geringen Dichten (kg/l) aber nur geringe volumetrische Energiedichten (MJ/l). Selbst bei tiefkaltem Flüssigwasserstoff (LH₂) liegt die Energiedichte bei nur rund 8,5 MJ/l und somit nicht einmal bei einem Viertel von Diesel. Unabhängig von den Energiewandlern "Brennstoffzelle" und "H₂-Verbrennungsmotor" stellt bei H₂-betriebenen Fahrzeugen - neben den hohen Kraftstoffkosten - die Unterbringung von ausreichenden Tankkapazitäten eine große Herausforderung dar. Bei LH₂ kommt ein anspruchsvoller Betankungsprozess dazu. Daimler Truck und Linde Engineering haben mit der sLH₂-Technologie (sLH₂: sub-cooled liquid hydrogen) deshalb ein neues Tank- und Betankungssystem für Flüssigwasserstoff entwickelt [8]. Nach dem Motto "Sicher, schnell und einfach" soll mit der sLH₂-Technologie ein markenübergreifender Betankungsstandard für H₂-betriebene LKW etabliert werden, was auch für Landmaschinen interessant sein könnte. Einen Beitrag über kryogene Wasserstofftanksysteme, der auch ein Druck-Dichte-Phasendiagramm enthält, gab es zudem in [9].

JCB vermeldete im Januar 2025 die Genehmigung des H₂-Verbrennungsmotors durch 11 europäische Zulassungsbehörden [10].

Stufengetriebe / Zapfwelle / Allradantrieb

Wesentliche Neu- oder Weiterentwicklungen bei Stufengetrieben der etablierten Traktorenherstellern wurden im Berichtszeitraum nicht bekannt. Der koreanische Hersteller LS kündigte Ende 2024 hingegen an, mit der MT9-Baureihe in den Leistungsbereich von 90 bis 105 kW

(122 bis 143 PS) vordringen und hierfür ein Doppelkupplungsgetriebe mit 8-fach-Lastschaltgetriebe und 32/32 Gängen (V/R) anbieten zu wollen. In [11] gab es einen aktualisierten Beitrag über Allradantriebstechnik bei Traktoren.

Stufenlosgetriebe

Zu dem bereits im Jahrbuch 2023 erwähnten leistungsverzweigten Stufenlosgetriebe von Weichai Lovol [12] wurden vom Hersteller weitere Informationen freigegeben. Das CVT wurde in enger Kooperation mit der österreichischen Firma VDS Getriebe entwickelt, **Bild 1**.

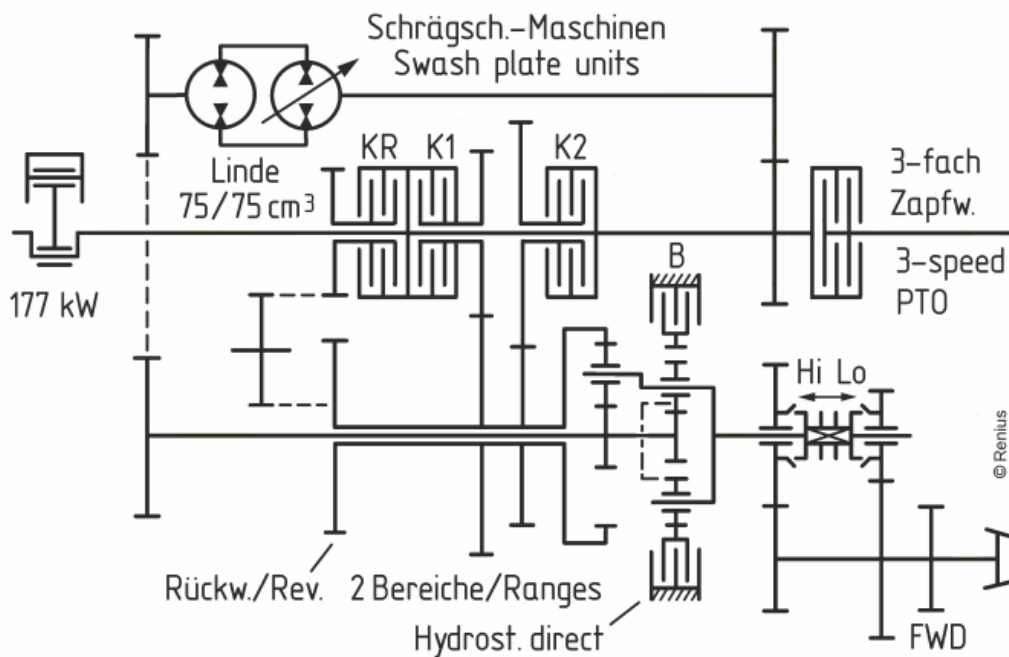


Bild 1: Erstes in China produziertes Stufenlosgetriebe mit h-m-Leistungsverzweigung von Weichai Lovol Agrartechnik für den Traktor Lovol P7000 CVT (177 kW Motor-Nennleistung), in Serie seit 2022.

Figure 1: First in China produced CVT with hydrostatic-mechanical power-split by Weichai Lovol for the Lovol P7000 CVT tractor (177 kW rated engine power), in series production since 2022.

Es wurde bereits 2021 mit dem neuen Traktor Lovol P7000 CVT in China vorgestellt und ab 2022 in Serie gefertigt. Die eingangsgekoppelte Struktur ähnelt Konzepten von VDS für andere Fahrzeuge [13, 14]. Da der Weichai-Konzern wesentlich an Linde Hydraulics beteiligt ist und Linde in China produziert, kommen von dort die Hydrostateinheiten. Das Getriebe arbeitet mit drei stufenlosen Fahrbereichen vorwärts und zwei rückwärts. Der erste Fahrbereich ist jeweils direkt hydrostatisch (bei geschlossener Bremse B), die nachfolgenden Fahrbereiche sind leistungsverzweigt (vorwärts über die Kupplungen K1 und K2, rückwärts über die Kupplung KR). Das Umschalten von K1 und K2 erfolgt hier nicht in einem durch die Struktur festgelegten Synchronpunkt, sondern wird durch Verstellen der Hydrostatik unterstützt. Nachgeordnet ist eine synchronisierte Hi-Lo-Gruppenschaltung.

Der österreichische Fahrzeughersteller REFORM stellte Ende 2024 das neue Transporter-Topmodell Muli T15 V (105 kW / 143 PS) mit hydrostatisch-mechanisch leistungsverzweigtem Stufenlosgetriebe vor. Dieses basiert ebenfalls auf der oben erwähnten VDS-Struktur mit drei Fahrbereichen vorwärts und zwei rückwärts. Dank der Hi-Lo-Gruppenschaltung sind Fahrgeschwindigkeiten bis 60 km/h bei stark reduzierter Motordrehzahl (1600 min⁻¹) möglich. Beim Hydrostat kommt eine 45/45er-Einheit von Bosch-Rexroth zur Anwendung. Das Längsdifferenzial (Planetengetriebe) für den permanenten Allradantrieb ist neu im Getriebe integriert und kann über eine Lamellenkupplung gesperrt werden. Das Getriebe weist zudem einen Abtrieb für eine zusätzliche Arbeitshydraulikpumpe auf, mit welcher An-/Aufbaugeräte mit hohem hydraulischen Leistungsbedarf (z.B. Kräne oder Hakenlifte) betrieben werden können (Fördervolumen bis 138 l/min, Maximaldruck 310 bar). Der bisherige Hybrid-Shift-Antrieb, bei welchem ein 8-Gang-Stufengetriebe mit einem Hydrostatgetriebe kombiniert wird, soll damit längerfristig abgelöst werden.

Der italienische Hersteller Antonio Carraro bietet für seine knickgelenkten Spezialtraktorbau-reihen seit einigen Jahren einen interessanten Hydrostatgetriebe-Baukasten an, **Tabelle 1**. Die Top-Version TONY wird als Hybridantrieb bezeichnet, dahintersteht aber eine klassische Hydrostateinheit, die mit einem unsynchronisierten Getriebe mit vier Fahrbereichen kombiniert wird. Der Fahrbereichswechsel kann dank "Shift-In-Motion-Technologie" während der Fahrt erfolgen. Über die Elektronik wird zwecks Unterbrechung des Leistungsflusses kurzzeitig das Neutralventil angesteuert, danach wird die Pumpe in die für den gewählten Fahrbereich passende Position gebracht und das Ventil wieder geschlossen.

Tabelle 1: Hydrostatgetriebe-Baukasten von Antonio Carraro (AC).

Table 1: Hydrostatic transmission kit from Antonio Carraro (AC).

	HST	Infinity	TONY
Hydropumpe: Bauart	Axialkolben / Schrägscheibe		
Hydropumpe: Verstellung	+/- 20°	+/- 20°	+/- 20°
Hydromotor: Bauart	Axialkolben / Schrägscheibe		
Hydromotor: Verstellung	keine (fixer Winkel)	in 3 Stufen, während Fahrt	keine (fixer Winkel)
Mechanische Fahrbereiche (FB)	3	2	4
Schaltung der mechanischen FB	im Stillstand	im Stillstand	während Fahrt
Geschwindigkeitsbereich (km/h)	0 - 28	0 - 40	0 - 40
Einbau in AC-Traktormodelle	3800/4800 HST	5800/7600 Infinity	8900 TONY
Leistungen (kW/PS)	bis 33/45	bis 55/75	bis 81/110

Elektrische Antriebstechnik

Die Entwicklung von elektrifizierten Antriebssträngen für Traktoren nimmt spürbar zu. Bisher verhindern allerdings die hohen Herstellkosten und Komponentengewichte sowie die geringe Energiedichte der notwendigen Energiespeicher eine Marktdurchdringung. Auf dem internationalen Getriebekongress "Dritev" 2024 in Baden-Baden wurden aktuelle Entwicklungen und

Studien diskutiert, wie die Wechselrichtertechnologie zur Gewichtsreduktion und Effizienzsteigerung beitragen kann.

Derzeit werden überwiegend zweistufige „isolated-gate bipolar transistor“ (IGBT) basierte Wechselrichter mit Strommodulationsfrequenzen von 5 kHz bis 8 kHz wegen ihres guten Preis-Leistungsverhältnisses eingesetzt [15]. Die Firma ZF präsentierte am Beispiel eines Automobilgetriebes, wie durch den Einsatz der deutlich teureren, aber besser leitfähigen Siliciumcarbid-MOSFETs (metal-oxide-semiconductor field-effect transistor) die Baugröße und das Gewicht des Wechselrichters halbiert, sowie die gesamte Systemeffizienz leicht gesteigert werden kann. Die Verwendung von SiC-MOSFETs ermöglicht eine Verdopplung der Schaltfrequenz der Strommodulation von 8 kHz auf 16 kHz. Der erzeugte Wechselstrom beinhaltet weniger Oberschwingungen und entspricht dem idealen Sinusverlauf besser, wodurch die E-Maschinen effizienter arbeiten [15]. Die höhere Schaltfrequenz erhöht zwar theoretisch die Verluste im Wechselrichter, allerdings sind die Verluste pro Schaltvorgang bei SiC-MOSFETs geringer als die von IGBT, weshalb die Systemeffizienz insgesamt leicht gesteigert wird. Deutlicher hervorheben lassen sich die Halbierung der Baugröße und des Gewichts des Wechselrichters, die mit der Verdopplung der Schaltfrequenz einhergehen [15]. Der gleiche Ansatz soll zukünftig auch Einzug in die Getriebeentwicklung von Nutzfahrzeugen und Baumaschinen finden [16].

Die Firmen Bosch und Hofer Powertrain zeigten das Effizienzsteigerungspotential durch den Einsatz von dreistufigen Wechselrichtern auf IGBT-Basis im Antriebsstrang von PKW anhand von Prüfstandmessungen mit einem Prototypengetriebe [17]. Während bei der Strommodulation mit zweistufigen Wechselrichtern die Spannungssprünge jeder Schaltung der Systemspannung von z.B. 800 V entsprechen, können die Spannungssprünge bei dreistufigen Wechselrichtern und gleicher Systemspannung auf 400 V halbiert werden. Dies reduziert die Oberwellen der erzeugten Wechsellspannung und verringert die durch Oberwellen entstehenden, harmonischen Verluste in den E-Maschinen um bis zu 75 % gegenüber den Verlusten bei Einsatz mit zweistufigen Wechselrichtern [17]. Unter Berücksichtigung der weiteren Verluste im Antriebsstrang lässt sich die Gesamteffizienz eines PKW durch dreistufige Umrichter um ca. 4 % steigern [17].

Von der Firma ABB werden dreistufige Wechselrichter auf IGBT-Basis zusammen mit permanenterregten Synchronmaschinen (PMSM) bereits in ersten Pilotmaschinen (Züge und Baumaschinen) eingesetzt und die Serienproduktion für Ende 2024 angekündigt [18]. Auf Rückfrage wurde ein verschobener Serienstart für Q1/Q2 in 2025 bestätigt. Neben dem genannten Effizienzsteigerungspotential der Energiewandlung wird durch die dreistufigen Wechselrichter eine höhere Dauerleistungsabgabe bei gleicher E-Maschine möglich. In **Bild 2** wird der Einfluss von IGBT-basierten Wechselrichtern auf die Effizienz und die Dauerleistungsabgabe anhand von berechneten Kennfeldern für eine permanenterregte Synchronmaschine (PMSM) exemplarisch dargestellt.

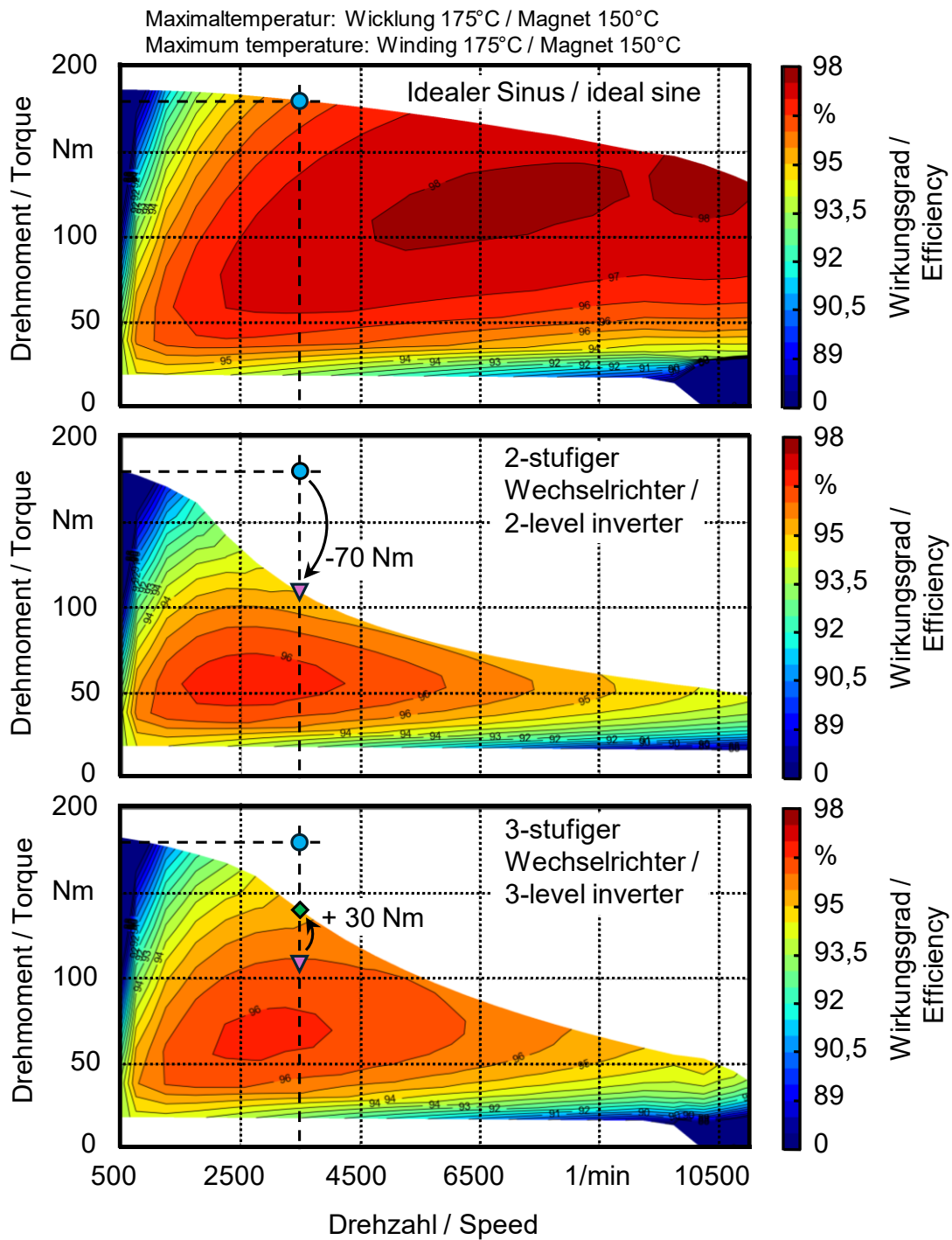


Bild 2: Vergleich von berechneten Dauerleistungskennfeldern einer permanent erregten Synchronmaschine (PMSM) für Nonroad-Fahrzeuge bei Versorgung mit ideal sinusförmiger Wechselspannung, 2-stufigem und 3-stufigem Wechselrichter, beide basierend auf IGBT-Basis (Quelle: ABB).

Figure 2: Comparison of calculated continuous power curves of permanent magnet synchronous machines (PMSM) for nonroad mobile machines, supplied by ideal sinusoidal alternating current, 2-level inverter or 3-level inverter, both based on IGBT (Quelle: ABB).

Nach Angaben von ABB lässt sich die Dauerleistungsabgabe abhängig von der elektromagnetischen Auslegung und dem betrachteten Betriebspunkt der vorliegenden E-Maschine zwischen 5 % und teilweise bis zu 60 % durch einen dreistufigen Wechselrichter im Vergleich zum Einsatz mit einem zweistufigen Wechselrichter steigern [18, 19]. Die Messungen mit den Pilotmaschinen konnten diese Werte bestätigen. Das gesteigerte Leistungspotential und die geringeren Verluste der E-Maschine führten zu verbesserter Rekuperation und deutlichem Energieeinsparpotential. Es kann aber ebenfalls kleiner dimensionierte Antriebsstränge ermöglichen oder eine nachträgliche Leistungssteigerung von bereits bestehenden Getriebearchitekturen.

Die Hauptnachteile von dreistufigen Wechselrichtern liegen in der höheren Komplexität und dem Bauraumbedarf, weil doppelt so viele IGBTs benötigt werden. Das erhöhte Dauerleistungspotential der E-Maschinen sollte dies jedoch überkompensieren.

Zu elektrischen Traktoren erschien eine interessante Literaturübersicht aus indischer Sicht mit 64 Quellen [20]. Schwerpunkt ist für den unteren Leistungsbereich die anwendungstechnische Beurteilung bezüglich Infrastruktur, Standort, Klima, Umwelt, Kosten und staatlicher Förderung. Derzeitige Konzepte seien noch drastisch teurer als Dieseltraktoren (die in Indien allerdings sehr einfach und kostengünstig sind). Als Gründe nennt man die noch immer hohen Kosten für die Batterien und die Einheit Konverter-E-Motor. Die Wartung sei deutlich einfacher, aber die Kosten für den Batterietausch „nach 5 bis 10 Jahren“ stünden dagegen. Man sieht allerdings Kostensenkungspotenzial – auch durch ganzheitlich neue Antriebskonzepte (schaltbare Fahrbereiche nicht erwähnt). Derzeit seien in einigen Ländern staatliche Förderungen noch ein erheblicher Kaufanreiz. Diese leicht optimistische Sicht harmoniert etwa mit derjenigen von Traktorfirma für den unteren Leistungsbereich. Noch ersetzen viele Hersteller einfach den Dieselmotor durch Batterie, Konverter und E-Motor und behalten den Rest der Antriebstechnik bei wie, z. B. bei der 2024 in moderater Stückzahl gestarteten Serienproduktion des Fendt e107 V Vario. Aus vertraulichen Informationen geht aber hervor, dass mehrere Firmen an vereinfachten Konzepten arbeiten – z. B. mit zwei Fahrbereichen ohne weitere Schaltgetriebe oder CVTs.

In [21] wurde die Wirkung eines parallel zur Batterie geschalteten Superkondensators (188 Farad, max. 51 V und 14,2 kg Gewicht) für den praktischen Betrieb eines elektrischen Staplers untersucht. Als Hauptvorteil wird nicht die Erhöhung der Speicherkapazität genannt (diese ist mit rund 0,07 kWh bei ca. 40 V fast unbedeutend), sondern die erhebliche Entlastung der Traktionsbatterie durch den Abbau von Stromspitzen. Trotz des geringen Spannungsniveaus liefert der Kondensator dabei Spitzenleistungen bis 132 kW.

In [22] und [23] wurde die Entwicklung und Validierung eines Brennstoffzellentraktors mit 95 kW auf Basis eines STEYR 4130 Expert CVT vorgestellt. Beschrieben werden u.a. die Auswahl und Integration der Kernkomponenten (H₂-Druckbehälter, Brennstoffzelle, elektrischer Antriebsstrang und Hochvolt-Batterie) sowie die Herausforderungen betreffend Wärmeabfuhr.

Entwicklungswerkzeuge und konstruktive Grundlagen

Die erste Entwicklungsgeneration elektrifizierter Antriebsstränge für mobile Arbeitsmaschinen basiert größtenteils auf bestehenden und leicht modifizierten Getriebekomponenten der konventionellen Antriebsstränge [24]. Mit zunehmender Entwicklungserfahrung im Bereich der elektrischen Antriebstechnik, verbreiteter Marktakzeptanz und steigendem Herstellkosten- druck werden aber vermehrt die Anpassungspotentiale der elektrifizierten Antriebsstränge umgesetzt.

In [24] wird eine Übersicht der anwendungsspezifischen Funktions- und Umgebungsanforderungen an elektrische Maschinen sowie deren Designfreiheitsgrade gegeben. Äquivalent zur Gestaltung der Drehmomentkurve von Dieselmotoren (Drehmomentanstieg, Bereich konstanter Leistung, max. Drehzahlkennlinie etc.) können durch Abstimmung des elektromagnetischen Designs die Eigenschaften der E-Maschine beeinflusst werden. Bei konstanten Motorabmessungen können insbesondere die Dauerleistungskurven so angepasst werden, dass entweder eine hohe Leistung bei maximaler Drehzahl, eine maximale Leistung über einen großen Drehzahlbereich oder ein hohes Drehmoment bei niedrigen Drehzahlen zur Verfügung stehen, **Bild 3**. Anders als bei Dieselmotoren wird bei E-Maschinen zwischen kurzzeitigen Peak-Leistungskurven und kontinuierlichen Dauerleistungskurven unterschieden.

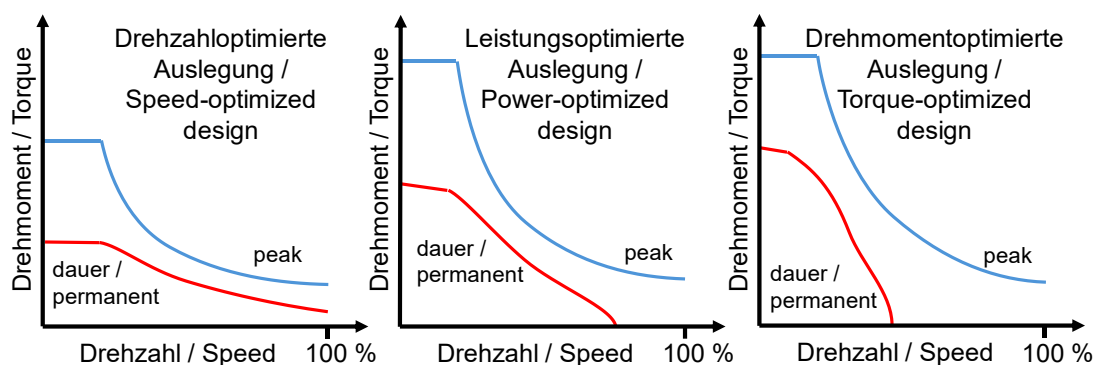


Bild 3: Variation von Drehmoment-Drehzahl-Kurven für E-Maschinen bei gleichen Bauraumabmaßen [24].

Figure 3: Variation of torque and speed characteristics for electrical machines with equal installation space dimensions [24].

Als beispielhafte Anwendungen für unterschiedliche E-Maschinendesigns werden der Fahrtrieb und der Antrieb von hydraulischen Nebenantrieben bei Baumaschinen genannt. Ersterer erfordert eine Dauerleistungsabgabe von mindestens 80 % der E-Maschinennennleistung bis zum 4-fachen der E-Maschinennendrehzahl, wohingegen E-Maschinen für hydraulische Nebenantriebe die Dauerleistung nur bis zum 2-fachen der E-Maschinennendrehzahl bereitstellen brauchen [24].

Die Wahl des richtigen E-Maschinendesigns ist ein Aspekt des Antriebsstrangdesigns. In [25] wird eine Methode vorgestellt, wie die passende Anzahl von Getriebeübersetzungen des Antriebsstrangs bestimmt werden kann, welche Vor- und Nachteile Einzel- sowie Mehrmotorkonzepte aufweisen und welche geänderten Getriebedesignanforderungen bei der Verwendung von E-Maschinen gegenüber Verbrennungsmotoren bestehen. Die Ausführungen beziehen sich auf mobile Arbeitsmaschinen, können aber in prinzipiellen Aussagen auf Traktor-Antriebsstränge übertragen werden. Es zeigt sich, dass für Fahrtriebe von Baumaschinen und Traktoren der Einsatz von mindestens zwei Übersetzungsstufen und zwei zentralen E-Maschinen vorteilhaft gegenüber Radnaben- oder Achsindividuellen-Antrieben ist [25]. Werden die Übersetzungsstufen wie im vorliegenden Fall lastschaltbar ausgeführt und das Getriebe in Reihe zu den E-Maschinen angeordnet, so ergeben sich während der Schaltung Drehmomenteinbrüche aufgrund des sehr großen Stufensprungs von 2,7. Diese sind vergleichbar zu Gruppenschaltungen in volllastschaltbaren Getrieben [26], können aber durch verbesserte Schaltalgorithmen und die gute Regelbarkeit der E-Maschinen reduziert werden [25]. Darüber hinaus können in Getrieben mit E-Maschinen der Drehmomentwandler zum Anfahren sowie die Kupplung für Fahrtrichtungswechsel entfallen und es werden weniger Kupplungen aufgrund der geringeren Ganganzahl benötigt. In diesem Fall wird allerdings eine zusätzliche E-Maschine zum Antrieb der Schmierpumpen und weiteren Nebenverbraucher benötigt.

Die zunehmende Verflechtung unterschiedlicher Entwicklungsdomänen in der Antriebsstrangentwicklung (mechanische Komponenten, Steuer- und Regelungssoftware, Bedienterminal und Benutzerschnittstelle etc.), erfordert neue und angepasste Entwicklungs- sowie Validierungsprozesse. In der Luftfahrt-, und Automobilbranche werden hierfür als Lösungsmöglichkeit bereits die Methoden des „Model Based Systems Engineering“ (MBSE) eingesetzt [27]. Dieser formalisierte Ansatz beinhaltet die Anwendung von Modellen zur Unterstützung von Systemanforderungs-, Design-, Analyse-, Verifikations- und Validierungsaktivitäten über den kompletten Entwicklungsprozess durch Aufbau eines „digitalen Produktzwillings“ [28]. In [27] wird diesbezüglich beleuchtet, wie der Einsatz von MBSE die Verifikation und Validierung automatisieren und somit effizienter gestalten kann. Die Ausführungen in [28] gehen einen Schritt weiter und beschreiben eine Erweiterung des MBSE-Frameworks durch Etablierung eines zusätzlichen V-Modells zur Entwicklung und virtuellen Validierung des „digitalen Zwillings“ im Vorfeld zu der eigentlichen Produktentwicklung. Durch die umfangreiche, virtuelle Validierung sollen Software- oder Designfehler noch früher erkannt und somit die Entwicklungszeiten und -kosten weiter verringert werden können.

Zusammenfassung

Bei klassischen Dieselmotoren für Traktoren gab es im Berichtszeitraum keine wesentlichen Neuheiten. Seit Frühjahr 2024 stehen die Emissionsgrenzwerte und Prüfanforderungen der EU-Abgasnorm EURO 7 für Straßenfahrzeuge fest. Ob daraus längerfristig eine neue Abgasstufe für Nonroad-Fahrzeuge abgeleitet wird, ist noch offen. Weiterhin viele Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten gibt es bei H₂-Verbrennungsmotoren und H₂-Tankkonzepten. Weichai Lovol gab weitere Information zu dem bereits im letzten Jahr erwähnten leistungsverzweigten Stufenlosgetriebe frei, so dass ein Getriebeplan erstellt werden konnte. Stark vorangetrieben

wird auch die Entwicklung von elektrifizierten Antriebssträngen. Neben dem Gesamtdesign, der Auslegung und Anordnung von E-Motoren und den Fahrbereichsgetrieben liegt ein Fokus auf der Leistungselektronik und hier insbesondere auf der Wechselrichtertechnologie. Die hohen Herstellkosten und Komponentengewichte sowie die geringe Energiedichte von Energiespeichern verhinderten bisher aber eine Marktdurchdringung von batterieelektrischen Traktoren. Die zunehmende Verflechtung von unterschiedlichen Entwicklungsdomänen erfordert angepasste Entwicklungs- und Validierungsprozesse, weshalb zunehmend Methoden des „Model Based Systems Engineering“ (MBSE) eingesetzt werden.

Literatur

- [1] N.N.: EUR-Lex - Acces to Europesan Union law. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1257/oj>, Zugriff am 24.01.2025.
- [2] N.N.: EU: Heavy-Duty Truck and Bus Engines. URL: <https://dieselnet.com/standards/eu/hd.php#test>, Zugriff am 24.01.2025.
- [3] N.N.: How hydrogen dual fuel engines can help reduce emissions. URL: <https://www.volvopenta.com/about-us/news-page/2024/oct/how-hydrogen-dual-fuel-engines-can-help-reduce-emissions/>, Zugriff am 24.01.2025.
- [4] N.N.: MAN D2862 Wasserstoff-Dual Fuel: Mehr Wasserstoff. Weniger Diesel. Weniger CO2-Emissionen. URL: <https://www.man.eu/engines/de/produkte/marine/man-dual-fuel-marinemotor.html>, Zugriff am 24.01.2025.
- [5] Buckley, J.: FPT Industrial premieres the N67 Hythane engine. <https://www.powerprogress.com/news/fpt-industrial-premieres-the-n67-hythane-engine/8039250.article>, Zugriff am 24.01.2025.
- [6] N.N.: Wasserstoff-Zukunft: Bosch startet Serienfertigung seines Brennstoffzellen-Antriebssystems. URL: <https://www.bosch-presse.de/pressportal/de/de/leitmeldung-bitte-aendern-255810.html>, Zugriff am 24.01.2025.
- [7] Mobilität: Wasserstoffmotor für Offroad-Anwendungen. URL: https://www.kit.edu/kit/pi_2024_098_mobilitaet-wasserstoffmotor-fuer-offroad-anwendungen.php, Zugriff am 24.01.2025.
- [8] Pizzutilo, E.; Acher, T.; Reuter, B.; Will, C. und Schafer, S.: Subcooled Liquid Hydrogen Technology for Heavy-Duty Trucks. *World Electric Vehicle Journal* 15 (2024), issue 1. <https://doi.org/10.3390/wevj15010022>, Zugriff am 03.01.2025.
- [9] Hergott, J.; Petitpas, G.: Speicherung von kryogenem Wasserstoff zum Einsatz in Langstrecken-Lkw. *MTZ* 84 (2023), Heft 7/8, S. 30-38.
- [10] N.N.: Landmark start to 2025 as JCB's hydrogen engine approved for use. URL: <https://www.jcb.com/en-gb/news/2025/01/landmark-start-to-2025-as-jcbs-hydrogen-engine-approved-for-use>, Zugriff am 24.01.2025.
- [11] Stirnimann, R.: Mit Allrad die Kraft auf den Boden bringen. *Eilbote* 72 (2024) H. 18, S. 8-12.

- [12] Stirnimann, R.; Renius, K.T.; Birkmann, C.: Motoren und Getriebe bei Traktoren. In: Frerichs, Ludger (Hrsg.): Jahrbuch Agrartechnik 2023. Braunschweig: Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge, 2024. S. 1-13.
- [13] Geimer, M.; Renius, K.T.; Stirnimann, R.: Motoren und Getriebe bei Traktoren. In: Frerichs, Ludger (Hrsg.): Jahrbuch Agrartechnik 2016. Braunschweig: Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge, 2017. S. 1-11.
- [14] Geimer, M.; Stirnimann, R.; Renius, K.T.: Motoren und Getriebe bei Traktoren. In: Frerichs, Ludger (Hrsg.): Jahrbuch Agrartechnik 2021. Braunschweig: Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge, 2022. S. 1-13.
- [15] Müller, G.; Kohr, M.; Lannert, T.: Trends for ultra compact inverters in e-drive systems – Next generation inverter. VDI-Berichte Nr. 2433 (2024), ISBN: 978-3-18-092433-5, S.445-455.
- [16] Glöckner, R.; Schinacher, S.: Electrified powertrain for a medium size wheel loader – Central-Drive System for a 10-20to Wheel loader. VDI-Berichte Nr. 2434 (2024), ISBN: 978-3-18-092434-2, S. 155-164.
- [17] Sierts, J.; Allgeier, J.; Stamer, F.: Efficiency increase of electric drives by use of multilevel inverters and permanent magnet synchronous motors. VDI-Berichte Nr. 2433 (2024), ISBN: 978-3-18-092433-5, S. 457-470.
- [18] Segbers, D.: More Power for Your Electric Machine. OEM Off-Highway, 18. Dezember, 2023, <https://www.oemoffhighway.com/electronics/article/22876658/abb-group-more-power-for-your-electric-machine>, Zugriff am: 30.12.2024.
- [19] Micke, T.; Horstmann, J.; Liebholz, L.; Ceranski, I.: Elektrifizierung von schweren Nutzfahrzeugen - Kleiner, leichter effizienter durch innovative Technologien. ABB Firmenschrift zum Webinar am 06.06.2024.
- [20] Gul, D.; Zama Banday, R.U.; Muzamil, M: Current status, performance characteristics and future perspective of electric tractor. Advances in Modern Agriculture 5 (2024) H. 4, Manuskript 3078 (17 Seiten). Open access.
- [21] Dvorak, J. S.: Utilizing Super Capacitors to Improve Battery Performance in Electric Machinery. Appl. Engng. in Agriculture 40 (2024) H. 6, S. 669-677.
- [22] Konrad, J.; Varlese, C.; Krizan, R.; Junger, C.; Hofmann, P.; Mayer, C.: Fuel Cell Electric Tractor FCTRAC - Powertrain, Thermal System, Hydrogen Storage, and Performance. Agricultural engineering.eu 79, 2024, Heft 3, S. 131–143, <https://www.agricultural-engineering.eu/landtechnik/article/view/3314/3789>, Zugriff am 03.01.2025.
- [23] Mayer, C.; Karner, J.; Eberhart, T.; Huber, K.; Konrad, J.: Fuel Cell Electric Tractor FCTRAC - Vehicle Design and Architecture. Agricultural engineering.eu 79, 2024, Heft 3, S. 144–163, <https://www.agricultural-engineering.eu/landtechnik/article/view/3315/3790>, Zugriff am 03.01.2025.
-

- [24] Finken, T.: Electrical Machines for Mobile Machinery – Application-specific Requirements, Design, and Layout. VDI-Berichte Nr. 2434 (2024), ISBN: 978-3-18-092434-2, S. 111-124.
- [25] Dingenen, J.; Faggiani, G.; Serrao, L.: Evolution of transmission technology for off-highway machines. VDI-Berichte Nr. 2434 (2024), ISBN: 978-3-18-092434-2, S. 79-93.
- [26] Birkmann, C.: Lastschaltvorgänge in Mehrfachgruppengetrieben für Standardtraktoren. Dissertation, TU Braunschweig, Shaker, 2020, ISBN: 978-3-8440-7370-6.
- [27] Vreeden, J.; Habermehl, C.; Jacobs, G.: From System Model to Operational Environment: Testing H2-Hybrid Drives for Mobile Machinery. VDI-Berichte Nr. 2434 (2024), ISBN: 978-3-18-092434-2, S. 51-64.
- [28] Honcak, R.: A MBSE approach for Virtual Verification & Validation of E-Drives with Digital Twins. VDI-Berichte Nr. 2433 (2024), ISBN: 978-3-18-092433-5, S. 159-174.

Autorendaten

Dipl.-Ing. agr. FH, Dipl.-Ing. Wirtschaft FH, Executive MBA Roger Stirnimann ist Agrartechnik-Dozent an der Berner Fachhochschule.

Dr.-Ing. Christian Birkmann ist Systemingenieur für elektronische Maschinenoptimierungssysteme in der Vorentwicklung für Traktoren bei CLAAS am Standort Paderborn.

Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Karl-Theodor Renius ist Professor im Ruhestand am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität München.

Bibliografische Angaben / Bibliographic Information

Wissenschaftliches Review / Scientific Review

Erfolgreiches Review am 16.02.2025

Empfohlene Zitierweise / Recommended Form of Citation

Stirnimann, Roger; Birkmann, Christian; Renius, Karl-Theodor.: Motoren und Getriebe bei Traktoren. In: Frerichs, Ludger (Hrsg.): Jahrbuch Agrartechnik 2024. Braunschweig: Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge, 2025. S. 1-13

Zitierfähige URL / Citable URL

<https://doi.org/10.24355/dbbs.084-202502071037-0>

Link zum Beitrag / Link to Article

<https://www.jahrbuch-agrartechnik.de/artikelansicht/motoren-und-getriebe-bei-traktoren-13.html>

Dieser Beitrag wird unter einer CC-BY-NC-ND 4.0 Lizenz veröffentlicht.