

Alternative Antriebssysteme für Landmaschinen

KTBL-Schrift 519





KTBL-Schrift 519

Alternative Antriebssysteme für Landmaschinen

Edgar Remmele | Henning Eckel | Peter Pickel |
Josef Rathbauer | Gerd Reinhold | Roger Stirnimann |
Roland Hörner | Norbert Uppenkamp

Herausgeber

Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), Darmstadt

Fachliche Begleitung

KTBL-Arbeitsgruppe „Alternative Antriebssysteme“

Prof. Dr. Roland Bauer | Henning Eckel | Dr. Bernhard Haidn | Roland Hörner |
Dr.-Ing. Bernd Krautkremer | Prof. Dr.-Ing. Peter Pickel | Dr. Josef Rathbauer |
Dr.-Ing. Gerd Reinhold | Dr. Edgar Remmele (Vorsitz) | Prof. Roger Stirnimann |
Dr. Norbert Uppenkamp

© KTBL 2020

Herausgeber und Vertrieb

Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL)

Bartningstraße 49 | 64289 Darmstadt

Telefon +49 6151 7001-0 | E-Mail: ktbl@ktbl.de

vertrieb@ktbl.de | Telefon Vertrieb +49 6151 7001-189

www.ktbl.de

Herausgegeben mit Förderung des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.

Titelfoto

© www.landpixel.eu

Druck und Bindung

Druck- und Verlagshaus Zarbock GmbH & Co. KG

Sontraer Straße 6 | 60386 Frankfurt am Main

Vorwort

Die verlässliche Versorgung von Traktoren, Mähreschern, Häckslern und anderen selbstfahrenden Maschinen mit Antriebsenergie ist für die landwirtschaftliche Produktion von entscheidender Bedeutung. Dabei wird überwiegend Dieseldieselkraftstoff eingesetzt. Jedoch stellen schädliche Umweltwirkungen und starke Preisschwankungen des Dieseldieselkraftstoffs eine ökologische und ökonomische Herausforderung dar.

Der Einsatz von Biokraftstoffen aus heimischer Produktion oder der Einsatz von elektrischem Strom können Lösungsansätze sein. Aktuelle Entwicklungen alternativer Antriebssysteme scheinen zunehmend den Ersatz von Dieseldieselkraftstoff zu ermöglichen und sind es somit wert, sich näher damit zu beschäftigen.

Bereits in dem KTBL-Fachgespräch „Alternative Energieträger und Antriebskonzepte für mobile Maschinen in der Land- und Forstwirtschaft“, das gemeinsam vom KTBL und dem Technologie- und Förderzentrum (TFZ) vom 20. bis 21. März 2013 in Straubing durchgeführt wurde, konnten verschiedene alternative Energieträger und Antriebskonzepte für mobile Maschinen in der Land- und Forstwirtschaft näher beleuchtet und eingeordnet werden.

Inzwischen liegen vielfältige Erfahrungen mit alternativen Antriebssystemen aus Forschung und Praxis vor, die zeigen, dass Biokraftstoffe und die Elektrifizierung mobiler Maschinen ein großes Potenzial für eine effiziente und umweltfreundliche Gestaltung des Maschineneinsatzes in der Landwirtschaft bieten. Eine von der KTBL-Arbeitsgemeinschaft „Energie“ eingesetzte Arbeitsgruppe hat sich deshalb des Themas erneut angenommen und ein Autorenteam gestellt.

Die KTBL-Arbeitsgruppe „Alternative Antriebssysteme“ hat mit großem ehrenamtlichem Engagement den aktuellen Stand des Wissens zusammengetragen, in dieser Schrift zusammengefasst und bewertet. Dafür danken wir ganz herzlich.

Kuratorium für Technik und Bauwesen
in der Landwirtschaft e.V. (KTBL)



DR. MARTIN KUNISCH
Hauptgeschäftsführer

Darmstadt, Februar 2020

Technologie- und Förderzentrum im
Kompetenzzentrum für Nachwachsende
Rohstoffe (TFZ)



DR. EDGAR REMMELE
Leiter Abteilung Erneuerbare Kraftstoffe
und Materialien

Straubing, Februar 2020

Inhalt

1	Einleitung	7
2	Kraftstoffnutzung in der Landwirtschaft	9
2.1	Klimaschutz und Kraftstoffnutzung.....	9
2.2	Rahmenbedingungen für die Kraftstoffnutzung	12
3	Antriebsenergie für die Motorsysteme.....	15
3.1	Kraftstoffe.....	15
3.2	Elektrischer Strom	26
4	Motorsysteme.....	34
4.1	Verbrennungsmotoren mit Abgasnachbehandlung	34
4.2	Elektrische Maschinen	44
5	Landwirtschaftliche Maschinen mit alternativen Antriebssystemen	47
5.1	Landwirtschaftliche Maschinen mit Pflanzenöl als Kraftstoff	47
5.2	Landwirtschaftliche Maschinen mit Biodiesel als Kraftstoff	51
5.3	Landwirtschaftliche Maschinen mit Methan als Kraftstoff.....	54
5.4	Elektrifizierung von landwirtschaftlichen Maschinen.....	57
6	Energiebedarf für landwirtschaftliche Arbeiten	72
6.1	Außen- und Innenwirtschaft	72
6.2	Energiespeicherung in Kraftstofftanks und in Batterien.....	73
7	Einordnung alternativer Antriebssysteme für die Nutzung in der Landwirtschaft	80
7.1	Bewertungskriterien für Energieträger und alternative Antriebssysteme.....	81
7.2	Einordnung verschiedener Energieträger und Antriebssysteme.....	86
7.3	Zusammenfassende Bewertung ausgewählter Antriebssysteme.....	89
8	Trends in der Landwirtschaft und in der Landtechnik	94
9	Schlussbetrachtung.....	99
	Literatur	103
	Abkürzungen	111
	Anhang.....	114
	Mitwirkende.....	127

1 Einleitung

Für die Energieversorgung mobiler Maschinen in der Landwirtschaft wird bisher fast ausschließlich fossiler Dieseldieselkraftstoff eingesetzt. Damit besteht eine hohe Abhängigkeit der landwirtschaftlichen Produktion von Energieimporten und eine damit verbundene hohe Krisenanfälligkeit. Die Verwendung von Dieseldieselkraftstoff ist darüber hinaus mit vielfältigen schädlichen Umweltwirkungen verbunden. Hohe und stark schwankende Preise für Kraftstoffe stellen zusätzlich ein wirtschaftliches Risiko für landwirtschaftliche Betriebe dar.

Eine erhebliche Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs von mobilen Maschinen und der damit verbundenen Treibhausgasemissionen kann aus heutiger Sicht nicht mehr alleine durch schrittweise Verbesserungen bestehender konventioneller Antriebstechnologien erreicht werden. Notwendig ist ein grundlegender Systemwandel. Ein Ansatz dafür ist der Übergang von fossilen auf erneuerbare Kraftstoffe. Ein anderer ist der Einsatz von elektrischen Maschinen als Primärtriebe oder als Komponenten zur Leistungsübertragung.

Wenn erneuerbare Kraftstoffe oder regenerativer Strom fossilen Dieseldieselkraftstoff als Antriebsenergie in Traktoren und anderen mobilen Maschinen ablösen, können diverse Vorteile entstehen. An erster Stelle steht eine Verbesserung der Energieversorgungssicherheit und damit die Sicherstellung der Nahrungsmittelproduktion. Außerdem können Treibhausgasemissionen vermindert, die regionale Wertschöpfung optimiert, der vorbeugende Boden- und Gewässerschutz verbessert und lokale Schadstoffemissionen reduziert werden (Remmele et al. 2014).

Nachdem die Landwirtschaft heute schon in großem Maßstab Rohstoffe für die Kraftstoffproduktion erzeugt (pflanzliche Öle, Zucker, Stärke, Lignozellulose), Kraftstoffe herstellt (Biodiesel, Rapsölkraftstoff, Ethanol und Biomethan) und selbst Strom produziert (Fotovoltaik, Windkraft, Biogas-Strom), ist es naheliegend, bei der Nutzung von Antriebsenergie auf die eigenen Ressourcen zurückzugreifen. Diese Energieträger und die dazugehörigen Antriebe für mobile Maschinen werden im Folgenden als „alternative Antriebssysteme“ bezeichnet. Zu den mobilen Maschinen zählen alle Zugmaschinen, Selbstfahrer, Umschlagmaschinen und Anbaugeräte mit eigenem Antriebssystem.

Um die oben genannten Vorteile von alternativen Antriebssystemen ausschöpfen zu können, sind im Interesse der Wettbewerbsfähigkeit der heimischen Landwirtschaft im internationalen Vergleich kostengünstige Lösungen und passende rechtliche Rahmenbedingungen erforderlich.

Die Schrift richtet sich an Vertreter der landwirtschaftlichen Beratung, der Landmaschinenindustrie und der angewandten Forschung und Entwicklung. Sie gibt einen Überblick über den Stand der Entwicklung von alternativen Antriebssystemen und unter-

stützt damit die Entscheidungsfindung, welche Antriebssysteme sinnvoll zum Einsatz kommen könnten. Die Bewertungsmatrix ermöglicht dem Leser eine zusammenfassende und systematische Einordnung der Energieträger und der Antriebssysteme.

2 Kraftstoffnutzung in der Landwirtschaft

2.1 Klimaschutz und Kraftstoffnutzung

Im Klimaschutzabkommen von Paris vom 12. Dezember 2015 haben sich die beteiligten Staaten auf das Ziel geeinigt, den Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur gegenüber der Temperatur im vorindustriellen Zeitalter auf 2 °C, wenn möglich auf 1,5 °C, zu begrenzen (Vereinte Nationen 2016). Um dies zu erreichen, müssen insbesondere die Industrieländer ihren Ausstoß an Treibhausgasen schnell und radikal senken. Die Landwirtschaft, die durch den lokal oft deutlich höheren Temperaturanstieg und durch die zunehmenden Extremwetterereignisse, wie Dürreperioden und Starkniederschläge, in hohem Maße vom Klimawandel betroffen sein wird, ist aufgefordert, ihren Beitrag zur Minderung der Treibhausgasemissionen zu leisten. Dies kommt sowohl im Klimaschutzgesetz der Bundesregierung (KSG 2019) als auch im sogenannten „Green Deal“ der Europäischen Kommission zum Ausdruck (COM Mittl. 640 final 2019). Die Landwirtschaft ist dabei sowohl als Treibhausgasemissionsquelle als auch als -senke zu sehen.

Das Aktionsprogramm Klimaschutz 2020 der Bundesregierung aus dem Jahr 2014 (BMUB 2014) nennt als bedeutende Treibhausgasquellen der Landwirtschaft die Emissionen aus der Tierhaltung, aus dem Düngemittelmanagement und dem Kraftstoffeinsatz.

Die Treibhausgasemissionen der Landwirtschaft betragen im Jahr 2017 insgesamt 72,6 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente, das sind rund 8 % der Treibhausgasemissionen in Deutschland (UBA 2019). Damit liegen die Treibhausgasemissionen etwa um 18 % unter dem Niveau des Bezugsjahres 1990. Wesentliche Rückgänge fanden in den Jahren 1990 bis 1994 statt und sind überwiegend mit dem Strukturwandel in den neuen Bundesländern zu erklären. Seit dem Jahr 2008 ist kein weiterer Rückgang der Emissionen zu verzeichnen (Abb. 1).

Im Klimaschutzplan 2050 (BMUB 2016) konkretisiert die Bundesregierung die Ziele zur Treibhausgasminderung für einzelne Sektoren: Gemäß dem Zwischenziel für das Jahr 2030 müssen die Treibhausgasemissionen der Landwirtschaft auf ein Niveau von 58 bis 61 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente gesenkt werden, was einer Reduzierung um 31 bis 34 % gegenüber dem Bezugsjahr 1990 entspricht bzw. einer Reduzierung von 11 bis 14 Millionen Tonnen ausgehend vom Emissionsniveau 2014. Zum Erreichen dieses Zieles wurden vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft zehn Maßnahmen in die Diskussion eingebracht (BMEL 2019), die in das Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung (Bundesregierung 2019) eingegangen sind. Im Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG 2019) sind die nationalen Klimaziele sowie die THG-Minderungsziele für einzelne Sektoren, u. a. auch der Landwirtschaft, verbindlich festgeschrieben. Wesentliches Merkmal ist auch die jährliche Erfolgskontrolle und die Pflicht zum Nachsteuern im Fall der Zielverfehlung.

Elektrisch-mechanisch leistungsverzweigte Getriebekonzepte

Elektrisch-mechanisch leistungsverzweigte Getriebekonzepte verbinden eine Leistungsverzweigung – eine energetisch hocheffiziente mechanische Leistungsübertragung – mit der Funktionalität eines Stufenloswandlers. Dabei wird vollständig auf hydrostatische Leistungsübertragung verzichtet, was sich energetisch in einem erhöhten Wirkungsgrad zeigt. Ein Beispiel für ein solches Konzept ist das von John Deere auf der Agritechnica 2019 vorgestellte stufenlose Traktorgetriebe eAutoPowr. Nach Firmenangaben liegt der Wirkungsgradvorteil bei 2–3 % gegenüber hydrostatisch-mechanisch leistungsverzweigten Getrieben. Das Getriebekonzept ähnelt einem „leistungsverzweigten Hybrid“, ist in der aktuellen Ausführung aber ein elektrisch-mechanisch leistungsverzweigtes Getriebekonzept, das zusätzlich zur Leistungsübertragung für den Fahrtrieb weitere 100 kW für Arbeitsgeräte und damit für verschiedene Applikationen bereitstellen kann (Abb. 21). In Kombination mit einer Traktionsbatterie ließe sich dieses Getriebekonzept zu einem leistungsverzweigten Hybrid erweitern.

- ① Durchtrieb und Zahnradstufe vom Dieselmotor zu MG1
- ② Erste elektrische Maschine (MG1)
- ③ Zweite elektrische Maschine (MG2)
- ④ Zahnradstufe von MG2 zum Doppelplanetengetriebe
- ⑤ Doppelplanetengetriebe
- ⑥ „LO“-Planetengetriebe mit Sonnen- und Ringantrieb
- ⑦ „HI“-Planetengetriebe mit Träger- und Sonnenantrieb
- ⑧ Wendeschaltung
- ⑨ Schaltgruppenmodul
- ⑩ Doppelumrichter für MG1 und MG2
- ⑪ Doppelumrichter für externe Anbaugeräte
- ⑫ Schnittstellen zur Kopplung von externen Anbaugeräten
- ⑬ Mechanischer Abtrieb Vorderachsdifferenzial
- ⑭ Mechanischer Abtrieb Hinterachsdifferenzial

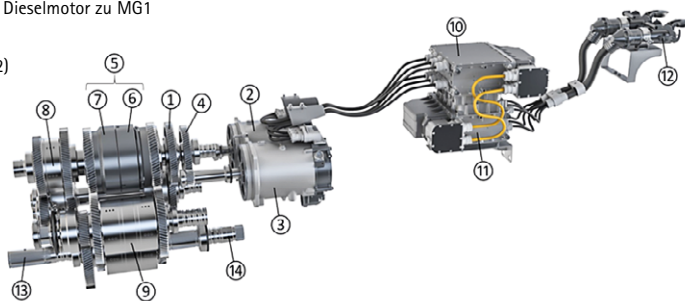


Abb. 21: Anordnung der wichtigsten Komponenten des eAutoPowr-Getriebes von John Deere (© John Deere)

Die elektrische Leistungsübertragung für Arbeitsgeräte erfolgt über die standardisierte AEF-Steckdose in Form von 480 V frequenzvariablem Dreiphasen-Wechselstrom (AC). Perspektivisch ist laut John Deere auch die Übertragung von 700 V Gleichstrom (DC) vorgesehen.

Ein Anwendungsbeispiel für die Bereitstellung elektrischer Leistung über ein elektrisch-mechanisches Getriebe ist das von John Deere und Joskin entwickelte Gülleausbringssystem mit elektrischen Triebachsen. Damit soll der Schlupf verringert, die Traktion erhöht und der Boden geschont werden. Außerdem soll eine höhere Kraftstoffeffizienz erreicht werden (DLG 2019).

Dieselektrische Konzepte

Bei dieselektrischen Konzepten (Abb. 22) wird die gesamte Leistung des Verbrennungsmotors in elektrische Leistung umgewandelt. Diese wird für den Betrieb von weiteren elektrischen Maschinen verwendet, welche dem Antrieb der eigentlichen „Arbeitsorgane“, z.B. Fahrtrieb, dienen. Eine mechanische Verbindung zwischen Verbrennungsmotor und Arbeitsantrieben ist nicht vorhanden, eine Traktionsbatterie ebenfalls nicht, was den dieselektrischen Antrieb vom Konzept des seriellen Hybrides unterscheidet. Der elektrische Antrieb übernimmt die Funktion eines stufenlosen Getriebes.

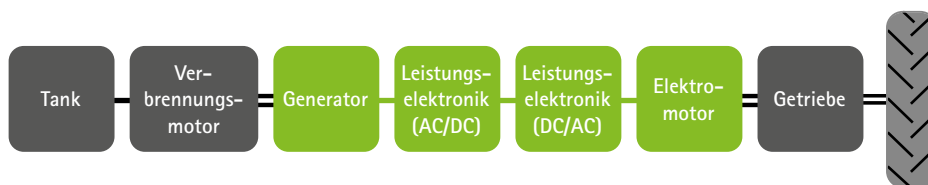


Abb. 22: Dieselektrisches Konzept

Ein typisches Serienbeispiel aus dem Non-Road-Bereich ist der Kettendozer D7E von Caterpillar: Der Dieselmotor treibt einen Generator an, die elektrische Leistung wird über die Leistungselektronik zu einem Elektromotor geführt, welcher diese wieder in mechanische Leistung zurückwandelt. Im Antriebsstrang werden damit lediglich der Drehmomentwandler sowie das Powershift-Getriebe ersetzt, was der Realisierung eines stufenlosen Fahrtriebes dient.

Mit dem RigiTrac EWD 120 oder dem Multi Tool Trac (Abb. 23) wurden auch Prototypen von Traktoren mit dieselektrischen Antrieben vorgestellt. Keines der Konzepte wird bislang in Serie gefertigt.



Abb. 23: Prototyp eines dieselektrischen Traktors
(© Multi Tool Trac BV)

Hybride Konzepte

Der griechisch-lateinische Begriff „hybrid“ kann mit „von zweierlei Herkunft“ oder „aus Verschiedenem zusammengesetzt“ übersetzt werden. Grundsätzlich sind zahlreiche Kombinationsmöglichkeiten denkbar. Während früher dieselektrische Antriebe häufig als Hybridsysteme bezeichnet wurden, hat sich bei Kraftfahrzeugen inzwischen durchgesetzt, dass sich der Begriff „Hybridfahrzeuge“ auf die Kombination von Verbrennungsmotor mit elektrischer Maschine und Batterie bezieht. Je nach Anordnung dieser Kom-