

# Schnittstellenübergreifende Elektrifizierung und Funktionen von Traktor und Anbaugerät

**Sebastian Tetzlaff**

Die Vorteile elektrischer Antriebstechnik sind seit langer Zeit aus Industrieanwendungen bekannt. Neben der Flexibilität und Variabilität bei der Systemintegration sind die sehr gute Steuer- und Regelbarkeit sowie die Überlastfähigkeit zu nennen. Um die Schlagkraft landwirtschaftlicher Maschinen und Geräte entscheidend zu erhöhen, müssen die verschiedenen Elektrik-/Elektronik-Systeme, Antriebe und Funktionen sowohl maschinenintern als auch auf der Basis eines schnittstellenübergreifenden Systemansatzes einfach vernetzt werden können. Dadurch können Maschinen, Maschinen-Geräte-Kombinationen und schließlich komplette Ernteketten intelligenter und effizienter eingesetzt werden. Am Beispiel einer Traktor-Schwader-Kombination wird die Tauglichkeit der elektrischen Antriebe und des Hybrid- und Schnittstellenkonzeptes nachgewiesen. Neu entwickelte Funktionen zum Überlastschutz und der Prozessprädiktion werden vorgestellt und deren Integration in das maschinenübergreifende Energie- und Betriebsmanagement beschrieben. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse und Lösungsansätze auf artverwandte Anwendungen ist sichergestellt.

## Schlüsselwörter

Elektrifizierung, Hybridisierung, Hochvolt, Traktor-Anbaugeräte-Schnittstelle

„Die Elektrizität wird im kommenden Jahrhundert die bewegende Kraft sein [...]“ schrieb die Zeitschrift DER MOTORWAGEN im Jahr 1898 – rückblickend auf die Fahrzeugentwicklung eine klare Fehleinschätzung. Tatsächlich waren um das Jahr 1900 etwa 40 % aller Fahrzeuge in den USA elektrisch angetrieben (ECKERMANN 2015). Im Jahr 2009 waren es lediglich noch rund 7 % (U.S. CENSUS BUREAU 2012). In Deutschland beträgt der Wert im Jahr 2015 bei Pkw sogar nur 0,3 %, inkl. Hybridfahrzeuge (KRAFTFAHRT-BUNDESAMT 2015). Auch die Idee, Funktionen landwirtschaftlicher Maschinen und Geräte elektrisch zu realisieren ist nicht neu. Bereits in den 1950er Jahren wurde in einem Verkaufsprospekt (INTERNATIONAL HARVESTER 1957) für einen Traktor mit seitlich angebauten und über einen Riementrieb angetriebenen Generator mit einer Anschlussleistung von 12,5 kVA sowie für eine passende Ballenpresse mit elektrischem Antrieb geworben. Die damals propagierten Anwendungsgebiete und Vorteile – mobile Energiequelle für handelsübliche Werkzeuge, Notstromaggregat bei Netzausfall und einfaches Zu- und Abschalten der Geräte – galten in ihren Grundzügen auch für die Elektrifizierungsbestrebungen in der jüngeren Vergangenheit, beschrieben z. B. bei WILMER (2007). Mit der breiten Verfügbarkeit moderner und leistungsfähiger Elektronik- und Halbleiterbauelemente erfährt die Technologie gegenwärtig eine Renaissance, in der komplexe Antriebslösungen effizient und präzise realisiert und erprobt werden. Im Mittelpunkt stehen dabei die funktionalen Vorteile bzw. Potenziale vernetzter Maschinenfunktionen und Betriebsstrategien sowie die Interaktion mit der Umwelt im Rahmen eines effizienten Prozessmanagements.

## Motivation für die Elektrifizierung und Hybridisierung einer Traktor-Anbaugeräte-Kombination

Aufgrund der umfangreichen Verfahrenstechnik im Mähdrescher ist es naheliegend, ein solches Fahrzeug als Ausgangsbasis zur Elektrifizierung zu nutzen. Die Maschine vereint viele Antriebe und Prozessschritte, die aufeinander abgestimmt werden müssen. Bei mobilen Arbeitsmaschinen werden elektrische Antriebe daher längst eingesetzt. Unter Nutzung der Bordnetzspannung (12 V) werden große mechanische oder hydraulische Leistungen mittels Verstellmotoren für Variatoren und Hydrostaten in gewissen Grenzen gesteuert und geregelt. Die Nutzung großer elektrischer Leistungen wird ein nächster Schritt sein. Im Rahmen der vorliegenden Studie war die Elektrifizierung einer selbstfahrenden Erntemaschine dennoch nicht zweckmäßig. Zum einen wegen der kurzen Erntefenster und des damit stark begrenzten Erprobungszeitraumes. Zum anderen ist ein derartiges System – mit Ausnahme des Vorsatzes – vollständig gekapselt, sodass es nicht möglich gewesen wäre, geeignete Schnittstellen für die Leistungs- und Kommunikationsflüsse zwischen „fremden“ (herstellerübergreifenden) Teilsystemen grundlegend zu untersuchen.

Mit Blick auf das Precision Farming bieten viele Anbaugeräte außerdem ein hohes Potenzial für erweiterte, intelligente Funktionen, welche sich mit den klassischen Konzepten der Leistungszuführung nur ungenügend oder mit enormem Aufwand realisieren ließen. Es ist deshalb zu erwarten, dass Anbaugeräte die ersten Serienanwendungen für elektrische Antriebe sein werden, mit dem Schlepper als vielfältig einsetzbare, mobile Energiequelle. Bestätigung findet diese These u. a. bei HERLITZIUS (2010). Aus den genannten Gründen lassen sich die für CLAAS zugrunde liegenden Ziele und Motivationen bei der Elektrifizierung einer Traktor-Anbaugeräte-Kombination ableiten:

- Darstellen und Lösen der allgemeinen Herausforderungen bei der Entwicklung elektrischer Fahrzeuge und Anbaugeräte.
- Ausarbeiten und Lösen der speziellen Aufgaben und Herausforderungen einer herstellerübergreifend nutzbaren („offenen“) Schnittstelle für Leistung und Kommunikation, einschließlich Sicherheitskonzept.
- Erschließung einer langen Erntesaison als Erprobungszeitraum sowohl für den Traktor als auch das Anbaugerät zur Funktionserprobung und dem Nutznachweis elektrischer Antriebe bei diversen Rand- und Umgebungsbedingungen
- Übertragbarkeit von Lösungen auf selbstfahrende Erntemaschinen
- Erstellung, Integration und Erprobung von vernetzten Maschinenfunktionen und Regelungsstrategien (maschinenintern und schnittstellenübergreifend).

Die auf dieser Grundlage definierte, exemplarische Maschinenkombination besteht aus einem Standardschlepper Arion 650 mit dem konzerneigenem Stufenlosgetriebe EQ200 und dem Vier-Kreis-Großflächenschwader Liner 4000. Nach der Einzelbetriebnahme und Vorerprobung wurde die Kombination im Feldversuch getestet.

### Elektrische Architektur des Gesamtsystems

Regelbare elektrische Antriebssysteme bestehen stets aus leistungselektronischen Baugruppen (LE) zur Energiestellung/-umformung und zugeordneten elektrischen Maschinen (EM) als energiewandelndes Bindeglied zur Funktionseinrichtung. Um eine hochdynamische, bedarfsgerechte Leistungsver-sorgung zu gewährleisten, müssen zwischen LE und EM Daten in Echtzeit übertragen werden. Zwischen dem generatorisch und dem motorisch arbeitendem Teil wird der Gleichspannungszwischenkreis gebildet, welcher als zentraler Knotenpunkt („Sammelschiene“) aufgefasst werden kann. Die drei Möglichkeiten, diese Grundstruktur zur schnittstellenübergreifenden Elektrifizierung aufzutrennen (Abbildung 1), wurden in der Literatur bereits ausgiebig behandelt, z. B. bei LINDNER et al. (2011), BALDINGER (2011), AGCO FENDT und JOHN DEERE (2011).

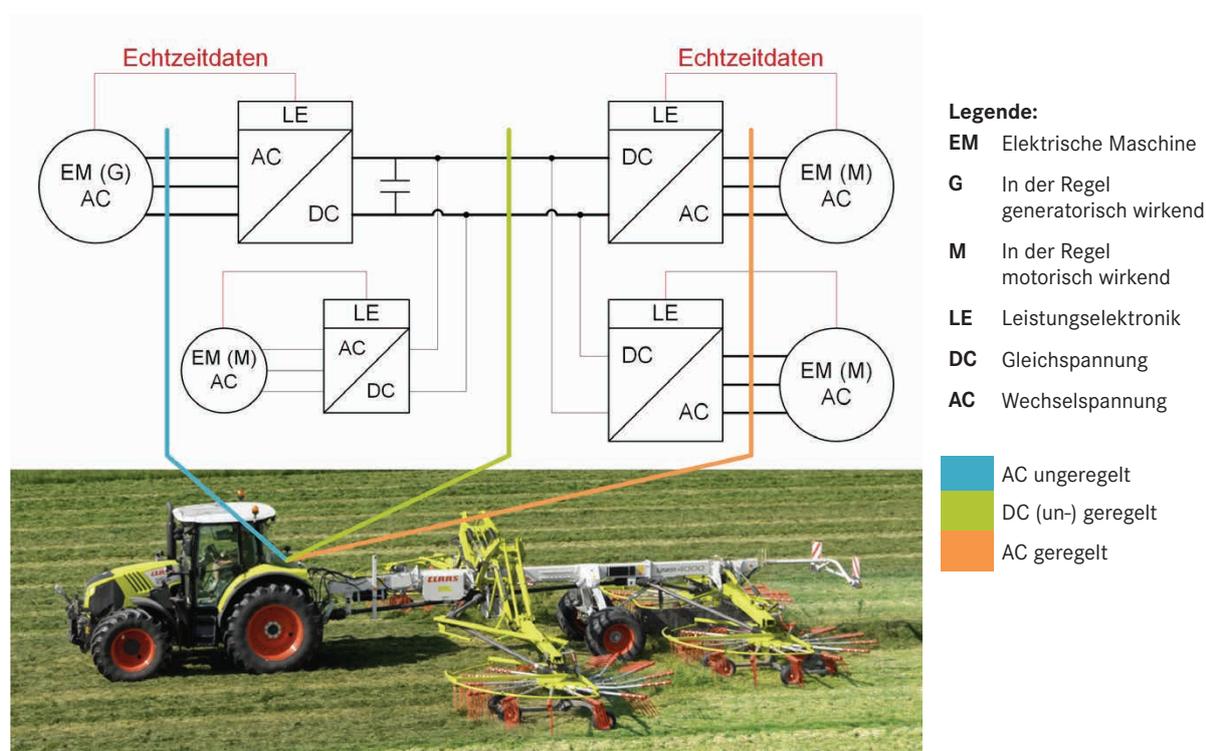


Abbildung 1: Grundstruktur und mögliche Schnittstellen eines elektrischen Antriebssystems

Tabelle 1 erläutert relevante Kriterien zur Bewertung der Schnittstellenkonzepte für landwirtschaftliche Fahrzeuge. Berücksichtigt werden sowohl Aspekte zum Gesamtsystem als auch zu einzelnen Applikationen. Die Schnittstellenkonzepte werden anhand der formulierten Projektziele und der gewählten Beispielapplikation bewertet (Tabelle 2). Dabei ist die Umsetzbarkeit einer offenen und herstellerübergreifenden Lösung das wichtigste Ziel.

Abhängig von den Rahmenbedingungen sind bei anderen Projektüberlegungen und Zielstellungen alternative Vorzugslösungen, z. B. für Spezialanwendungen mit eingeschränkter Gerätevarianz, denkbar.

Tabelle 1: Relevante Aspekte als Bewertungskriterien der Schnittstellenkonzepte

Nr.	Kriterium	Erläuterungen, Aspekte
1	Rekonfigurierbarkeit zwischen Traktor und Anbaugerät	Einfache Identifizierung und Initialisierung der gepaarten Teilsysteme und Antriebseinheiten (LE/EM) Unkomplizierte Nutzung von Komponenten verschiedener Hersteller beidseitig der Schnittstelle Keine Antriebskalibrierung nach Kopplung von Traktor und Anbaugerät
2	Komplexität der Schnittstelle	Geringer Aufwand für Leistungs- und Signalübertragung Geringe Anforderungen an das eingesetzte Bus-System, insbesondere Verzicht auf notwendige Echtzeitfähigkeit
3	Zukunftsfähigkeit	Einsatz robuster, sensorloser Maschinen mit hoher Performance und Effizienz in einem Open-loop-Regelkonzept in Traktor und/oder Anbaugerät
4	Elektrifizierungsumfang beidseitig der Schnittstelle	Mögliche Anzahl unabhängiger elektrischer Antriebe in den Teilsystemen Erweiterungsfähigkeit der elektrischen Architektur des Systems Anzahl notwendiger Steckdosen
5	Amortisierung der Systemkosten	Mehrfachverwendbarkeit von Systemkomponenten Günstige Systemkosten mit optimaler Spezifikation, Konfiguration und Topologie für die Anwendung
6	Bestehende Systeme nutzen	Erprobte und verbreitete Systeme und Funktionen weiter nutzen und ausbauen, z. B. ISOBUS zur Antriebssteuerung Zugang zu bestehenden Kühlsystemen
7	Klare Zuordnung von Verantwortlichkeiten und Aufgaben	Eindeutige Trennung von Energiebereitstellung und Prozessverantwortung; Sicherheitsmanagement Betriebs-, Last- und Energiemanagement sind optimal auf die Applikation abgestimmt
8	Optimierungspotenzial des Gesamtsystems und der Teilsysteme	Komponenten sind auf die Anwendung und Applikation abgestimmt; keine Unter- oder Überspezifikation Optimale Abstimmung von LE und EM, sodass „Mehrbereichsbetrieb“ und Leistungsklassen entfallen Kühlung ist optimal an die Bedürfnisse angepasst

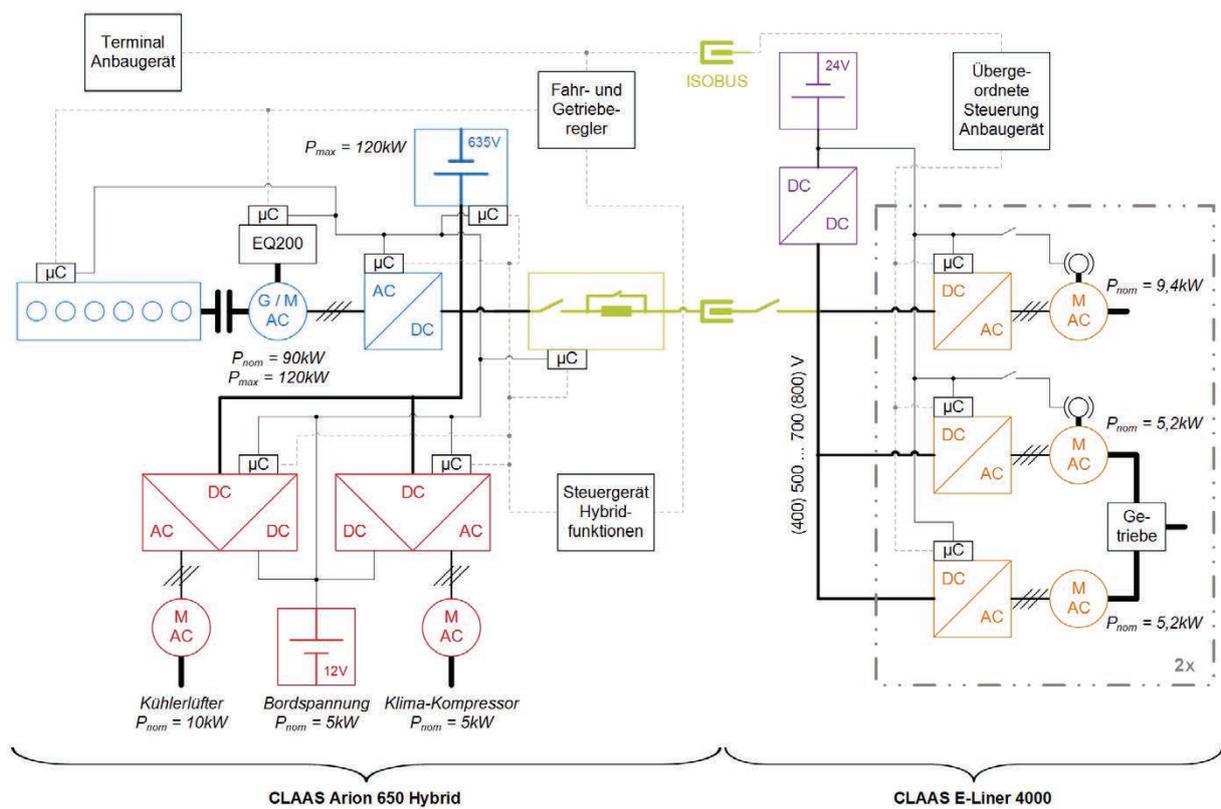
Tabelle 2: Bewertung der Schnittstellenkonzepte anhand der Kriterien aus Tabelle 1

	Nr. des Kriteriums							
	1	2	3	4	5	6	7	8
AC unregelt	-	-	0	-	-	-	0	0
DC (un-)regelt	+	+	+	+	0	0	+	+
AC geregelt	-	-	0	-	+	0	-	-

- = schlecht erfüllt  
o = durchschnittlich erfüllt  
+ = gut erfüllt

Die Übertragung einer unregelmäßigen Wechselspannung ist wegen der schlechten Amortisierungsmöglichkeiten der Systemkosten nicht sinnvoll. Verschärfend wirkt sich dabei aus, dass gemäß dem Stand der Technik für elektrische Hochvolt-Systeme, z. B. ISO6469-3 (DIN 2011) und ISO/FDIS 16230-1 (DIN 2015), dennoch Schutz- und Trenneinrichtungen vorgehalten werden müssen. Der Initialaufwand auf Seite der Energieerzeugung ist also in jedem Fall hoch, weshalb die traktorinterne Elektrifizierung zumindest möglich sein sollte. Nach Tabelle 2 erweist sich die Gleichspannungsüber-

tragung als die am besten geeignete Schnittstellenlösung. Insbesondere vor dem Hintergrund der stärker zu gewichtenden Aspekte der Austauschbarkeit und beliebigen Kombinierbarkeit von Traktor und Anbaugerät (und somit der verbauten Komponenten und deren Anzahl) über einen weiten Leistungs- und Betriebsbereich ist diese Art der Leistungsübertragung ohne Ansprüche an Frequenz und Amplitude vorteilhaft. Mit Verweis auf diese Hauptforderung und der notwendigen Anzahl Antriebe für den Vier-Kreiselschwader wird die Gleichspannungsübertragung auch von einer in GEISSLER und HERLITZIUS (2014) vorgestellten Studie als vorteilhaft bezeichnet. Die Inbetriebnahme der Antriebs-einheiten erfolgt einmalig durch den Traktor- bzw. Gerätehersteller. Sie werden während ihrer Lebensdauer nicht mehr getrennt, sodass keine unbekanntenen Paarungen entstehen können. Aufwendige Identifizierungen durch Übertragung sämtlicher Maschinen- und Umrichterparameter über die Schnittstelle entfallen. Ebenso ist ein Teachen von Antrieben mit Singleturngerber oder ohne Drehgeber zur Bestimmung der initialen Polradlage und des Modells der Motorinduktivitäten durch den Endanwender nicht notwendig. Abgesehen vom Zeitaufwand und den potenziellen Gefahren durch unvorhergesehene Bewegungen des Antriebes ist ein solcher Vorgang in Systemen mit Übertragung einer geregelten AC-Spannung nur mit neuester und somit teurer Technologie möglich, sofern die Applikation nur eine Drehrichtung erlaubt. Bei Verwendung klassischer Hardware müssen hinge-



**Legende:**

- Geregelt Energieerzeugung
  - Hilfsverbraucher (USV)
  - Schnittstelle im Gleichspannungszwischenkreis und ISOBUS
- Traktorinterne Nebenverbraucher
  - Kreiselantriebe

Abbildung 2: Blockschaltbild der elektrischen Gesamtsystemarchitektur der Funktionsmuster

gen stets beide Drehrichtungen angesteuert werden. Wenn die Komponentenkosten für die optimale Auslegung der Antriebe mit getrennten Teilsystemen im Gleichspannungszwischenkreis wie prognostiziert sinken (BREU 2014), wird der zunächst naheliegende Kostenvorteil eines AC-Systems auch in Systemen mit wenigen Antrieben zukünftig an Relevanz verlieren.

Die dargelegte Betrachtung bildete die Entscheidungsgrundlage zur Ausarbeitung der Gesamtsystemarchitektur der Prototypen. Abbildung 2 zeigt diese als Blockschaltbild und benennt die Leistungsdaten. Des Weiteren sind das elektrische Hochvoltsystem, die 12/24V-Steuerspannungsversorgung und die Kommunikationsnetzwerke skizziert. Nicht dargestellt ist die zur Basisabsicherung und -freischaltung implementierte 12V-Sicherheitsschleife „HVIL“ (High Voltage Interlock Loop). Die Bus-Kommunikation zwischen Traktor und Anbaugerät erfolgt ausschließlich über den bekannten ISOBUS.

### Aufbau und Funktion des Hybridschleppers

Der elektrifizierte Schlepper auf Basis des CLAAS Arion 650 ist mit einem Kurbelwellenstartergenerator (permanenterregte Synchronmaschine PSM) zwischen Dieselmotor und Stufenlosgetriebe ausgestattet. Abgesichert über Trennschütze ist direkt an den Gleichspannungszwischenkreis eine Hochvoltbatterie mit 635 V Nennspannung und einer Gesamtkapazität von 5,75 kWh (100 % SOC (State of charge)) angeschlossen. Der Dieselmotor lässt sich eingangsseitig des Generators vom Antriebsstrang abkuppeln, somit ist das Fahrzeug ein erweiterter Parallelhybrid. Motorlüfter und Klimaanlage werden als exemplarisch ausgewählte Nebenaggregate elektrisch aus je einem Dualwechselrichter betrieben (Abbildung 2). Das 12V-Bordnetz wird durch Parallelschaltung der beiden integrierten DC/DC-Wandler mit je 200 A Ausgangsstrom gespeist, wodurch die Verfügbarkeit im Defektfall gesteigert wird. Die Hochvoltkomponenten stammen von Firmen der Magna-Gruppe, welche auch mit Engineering-Dienstleistungen den Aufbau und die Inbetriebnahme des Traktors begleitete.

Die Komponenten sind in die Traktorarchitektur integriert (Abbildung 3). Lediglich die Kühlung für LE, EM und HV-Batterie ist auf dem Fahrzeugdach installiert. Das System ist als IT-Netz mit Ein-Fehler-Toleranz gemäß den Gestaltungsrichtlinien nach DIN VDE 0100-410:2007-0 (DIN 2007) aufgebaut. Sämtliche Leitungen, die Spannungen oberhalb der Schutzkleinspannung führen, sind gemäß den allgemeinen Richtlinien orange gekennzeichnet und für den Benutzer schwer zugänglich verlegt. Abdeckungen und Gehäuse sind in die fahrzeuginterne Sicherheitsschleife HVIL einbezogen, welche bei Unterbrechung die Systemspannung abschaltet. Zur Anbaugeräte-Steckdose wird ein zweiter HVIL bereitgestellt. Bei eingeschaltetem Hochvolt-System wird der Isolationswiderstand gegenüber dem Fahrzeugchassis permanent überwacht, ein angeschlossenes Anbaugerät wird darin einbezogen. Bei Unterschreitung der zulässigen Grenzen nach ISO 6469-3 (DIN 2011) werden zur Gefährdungsminimierung geeignete Fehlerreaktionen ausgelöst.

Der gezeigte Aufbau als Parallelhybrid ermöglicht den rein elektrischen, hybriden und konventionellen Betrieb des Fahrtriebsstranges, der Hydraulikeinrichtungen und natürlich der elektrischen Verbraucher. Im Speziellen sind folgende Hybridfunktionen implementiert (HEYMANN 2015):

- Elektrisches Boosten und Rekuperieren
- Start/Stop des Dieselmotors im Stand und während der Fahrt
- Rein elektrischer Betrieb auch mit elektrischem Anbaugerät

Die Boostfunktion dient weniger der Gesamtleistungserhöhung, sondern vielmehr zur Betriebspunktverschiebung und Phlegmatisierung des Dieselmotors (Abbildung 8). Anders als beim konventionellen Traktor kann bei einem Lastanstieg das Drehmoment an der Welle erhöht werden, ohne dass der Antriebsstrang zuvor durch Anpassung der Getriebeübersetzung entlastet wird. Stattdessen bleibt die Getriebeübersetzung konstant und der Traktor verliert nicht an Geschwindigkeit. Die Neueinstellung des Arbeitspunktes des Dieselmotors kann also unter voller Last erfolgen, indem der Verbrennungsmotor durch den aus der Batterie gespeisten Generator entlastet wird.

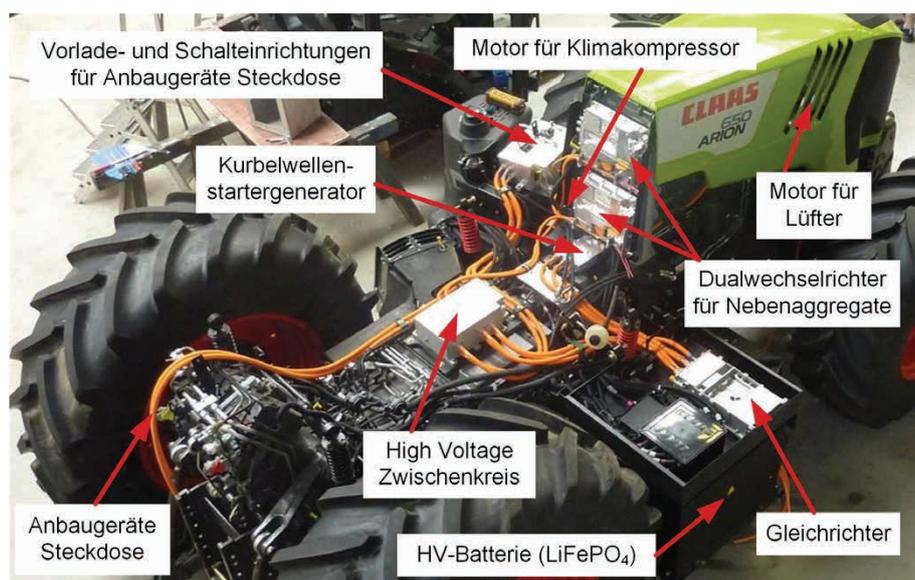


Abbildung 3: Hochvoltsystems im CLAAS Arion 650 Hybrid (Kühlung nicht abgebildet)

Die Hardware für eine Start/Stop-Funktion liefert das System frei Haus. Softwareseitig wurde die Funktion in die Prototypensteuerung implementiert, um z. B. im Zusammenhang mit einer Klimatisierung im Stand, einer elektrischen Rangierfunktion oder auch geeigneten Fahrsituationen Hybridisierungspotenziale identifizieren und untersuchen zu können. Je nach Betriebszustand des Traktors (Abhängigkeiten bestehen z. B. zur Gesamtlast im Antriebsstrang und zur Fahrgeschwindigkeit) und des elektrischen Systems (Ladezustand der HV-Batterie, Stromaufnahme der elektrischen Verbraucher) wird der Dieselmotor automatisch abgeschaltet und bei Fahrzeugstillstand die Leerlaufdrehzahl der Getriebeeingangswelle durch den Generator auf etwa 600 U/min eingestellt, um den Hydraulikdruck aufrechtzuerhalten. Beim Zuschalten des Dieselmotors werden vor dem Einkuppeln die Drehzahlen von Verbrennungsmotor und Generator synchronisiert, um die Kupplung zu schonen. Der Motor wird bei aktivem Start/Stop also nicht angeschleppt, sondern über den konventionellen Anlasser per Supercaps gestartet. Die Start/Stop-Funktion lässt sich durch den Fahrer jederzeit deaktivieren.

Für den zeitlich begrenzten rein elektrischen Betrieb eines Schleppers sind unterschiedliche Anwendungen denkbar: In der Innenwirtschaft zum Beispiel für emissionsfreie Durchfahrten im Stall oder in der Außenwirtschaft während Rüstzeiten, wie etwa dem Einstellen und Vorbereiten von Anbaugeräten. Weiterhin ist z. B. auch ein rein elektrischer Schwadbetrieb über mehrere hundert Meter möglich ist (Abbildung 4). Im Versuch wurde gleichzeitig die Fahrgeschwindigkeit erhöht.

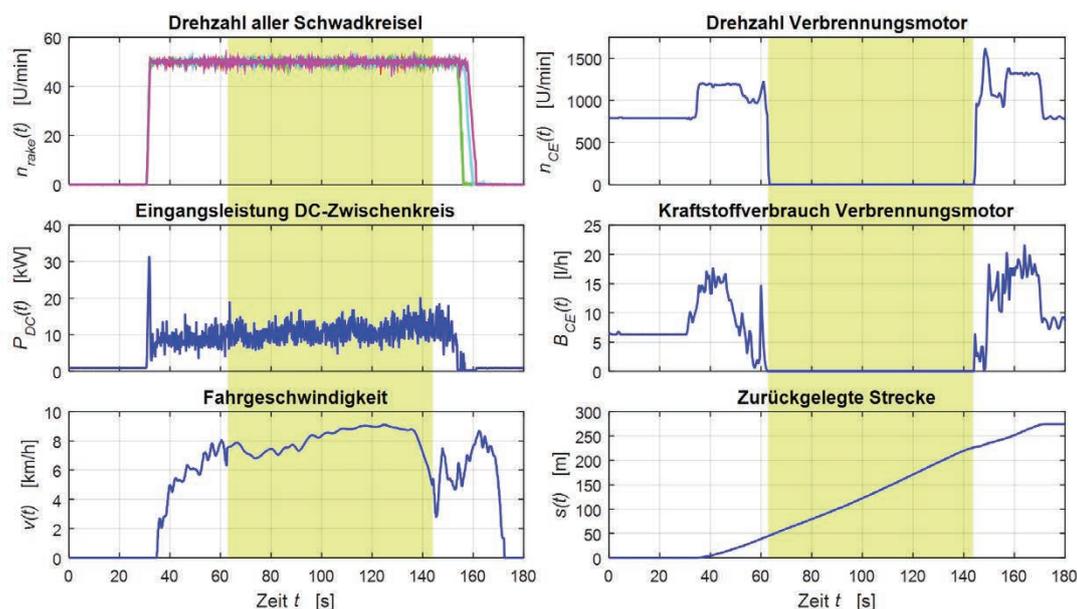


Abbildung 4: Emissionsfreier Schwadbetrieb (grüne Markierung) im genutzten SOC-Bereich (25 %)

## Aufbau und Funktion des Großflächenschwaders

Am Vier-Kreiselschwader wurde der mechanische Antriebsstrang für den Kreiselantrieb vollständig durch ein variables Antriebssystem nach CLAAS (2010) ersetzt. Alle weiteren Systeme entsprechen der Serienmaschine. Die Elektrifizierung erfolgte ausschließlich mit luftgekühlten Standardindustriekomponenten. Die permanenten Synchronmaschinen mit Resolver sind direkt an eigens entwickelte Schwadgetriebe angeflanscht. Das Getriebe ist an allen Kreiseln baugleich und nimmt, wie im Blockschaltbild (Abbildung 2) und in Abbildung 5 dargestellt ist, an den äußeren Kreiseln jeweils eine Maschine auf, an den inneren hingegen je zwei kleinere Einheiten. Neben einer optimalen Bauraumnutzung wurde damit eine Testumgebung zur Erprobung mechanisch gekoppelter Antriebe geschaffen, wie sie auch in anderen Maschinen sinnvoll sein können. Dieser Doppelantrieb arbeitet über eine Echtzeitkoppelung (EtherCAT) nach dem Master-Slave-Prinzip mit drehzahl geregelter Führungsmaschine und Drehmomentfolger. Die Verschaltungslogik ist dabei derart, dass bei einem Ausfall des Masters der Slave automatisch in die Drehzahlregelung wechselt, womit die Verfügbarkeit der Arbeitseinrichtung gesteigert wird.

Aus dem Blockschaltbild (Abbildung 2) ist ersichtlich, dass die Antriebe aus einer unterbrechungsfreien Spannungsversorgung (USV) mit Steuerspannung versorgt werden. Das Spannungsniveau von 24 V liegt in den verwendeten Systemkomponenten begründet. Zum einen werden die Antriebsumrichter aus der USV auch nach Abschaltung des Systems für eine gewisse Zeit mit Steuerspannung versorgt, um die ohnehin vorhandenen Chopper und Bremswiderstände für eine aktive Entladefunktion des Zwischenkreises, wie sie im Stand der Technik (z.B. ISO 6469-3) in der Regel gefordert wird, zu nutzen. Zum anderen stellt sie mittels eines Tasters eine Serviceeinrichtung zum Lüften der Haltebremsen der Kreisel für Wartungsarbeiten dar. Die Haltebremsen entsprechen den Anforderungen der Maschinenrichtlinie, d. h. der Richtlinie 2006/42/EG (EU 2006), wonach gemäß Anhang 1, Punkt 1.3.9 „verhindert werden muss, dass sich „[...] ein stillgesetztes Maschinenteil ohne Betätigung der Stellteile aus seiner Ruhestellung bewegt [...]“. Als „gezogene auswechselbare Maschine“, die

die Funktion des Zugfahrzeugs erweitert, fällt der Großflächenschwader in den Geltungsbereich der sogenannten Traktorenrichtlinie, der Richtlinie 2003/37/EG (EU 2003). Da das Risiko unkontrollierter Bewegungen stillgesetzter Maschinenteile in der Richtlinie 2003/37/EG derzeit nicht erfasst ist, kommt die Maschinenrichtlinie 2006/42/EG zur Anwendung (Erwägungsgründe Punkt (8) in RL 2006/42/EG).



Abbildung 5: Funktionsmuster CLAAS E-Liner 4000

Gleichzeitig erhöht sich die Sicherheit bei Wartungsarbeiten im Schaltschrank, indem das Drehen der Kreisel (Spannungsinduktion durch PSM) nur in Kombination mit dem Drücken des Servicetasters möglich ist. Wie beim Schlepper auch, sind der Hochvolt-Stecker und die Schaltschranktüren in die Interlockschleife HVIL einbezogen. Letztere können für Diagnosearbeiten mittels eines Schlüsselschalters überbrückt werden. Ebenfalls sind sämtliche Hochvolt führenden Leitungen orange ummantelt und gekennzeichnet. Insbesondere im Bereich der Auslegergelenke sind sie mit zusätzlichen Knickschutzeinrichtungen versehen und befestigt. Jedoch können die Kabel am Anbaugerät – anders als beim Schlepper – allein wegen der Zuleitung zur Steckdose nicht vollständig abgeschottet verlegt werden. Die Nutzung sollte deshalb nur mit einem Traktor oder Zapfwellengenerator mit Isolationsüberwachung nach ISO/FDIS 16230-1 (DIN 2015) erfolgen.

### Integration des Anbaugerätes in das Betriebs- und Energiemanagement des Traktors

Wie das Blockschaltbild in Abbildung 2 zeigt, kann der Schlepper den Strom im Leitungszweig zur Steckdose nicht einzeln aktiv begrenzen. Lediglich eine Vorladeeinheit, Strommessung und die Hauptschütze als Basisschutz sind vorhanden. Mit Blick auf Entwicklungen zur Serienanwendbarkeit elektrischer Antriebe ist diese Einsparung zweckmäßig, weil mit dem realisierten Schnittstellen- und Kommunikationskonzept nach TETZLAFF (2014) neben dem unkomplizierten System-Handshake auch ein dynamisch agierender Überlastschutz leicht implementiert werden kann. Die Lastüberwachung mit bedarfsweiser Stromlimitierung basiert auf einer Signalmeldung bezüglich des für den Schlepper

ertragbaren nominellen Laststroms und einem anbaugeräteseitig hinterlegtem Lastmanagement (Abbildung 6), welches diesen Strom einstellt und für eine optimale Performance hierfür u. a. die aktuelle Antriebsauslastung und Sollwertänderungen zur Vorsteuerung nutzt. Abbildung 7 veranschaulicht die Ausgangssituation und den Lösungsansatz dieses Lastmanagements für den Schwader: Der geringer ausgelastete Antrieb stellt seine Reserve dem höher ausgelasteten Antrieb zur Verfügung, womit auch bei Restriktionen und wechselnden Bedingungen an den Kreiseln genügend Reserven vorhanden sind und eine optimale Prozessdurchführung im Rahmen der verfügbaren Gesamtleistung gewährleistet ist. Weil die Steuerung des Anbaugerätes den Arbeitsprozess und aktuellen Systemzustand am besten kennt, ist diese Lösung aus Applikationssicht sehr vorteilhaft. Die strikte Aufgabentrennung zwischen Energiemanagement (Traktor) und prozessorientiertem Lastmanagement (Schwader) ist aber auch aus Gründen der funktionalen Sicherheit und Herstellerhaftung günstig. Die so definierten Verantwortungsbereiche können unter allen Umständen eingehalten werden, weil der Traktor bei Missachtung der Lastvorgaben die Steckdose in jedem Fall abschalten und sich selbst schützen kann (Schütze in den HV-Leitungen). Umgekehrt kann bei Bedarf auch der Schwader seine Hauptschütze eigenverantwortlich in den HV-Leitungen zur Basisabsicherung öffnen.

Der Schwader kann als Pendant zum Überlastschutz Wünsche zum erwarteten Leistungsbedarf und -verlauf an den Schlepper richten (Abbildung 6), woraufhin dieser nach Möglichkeit sein inter-

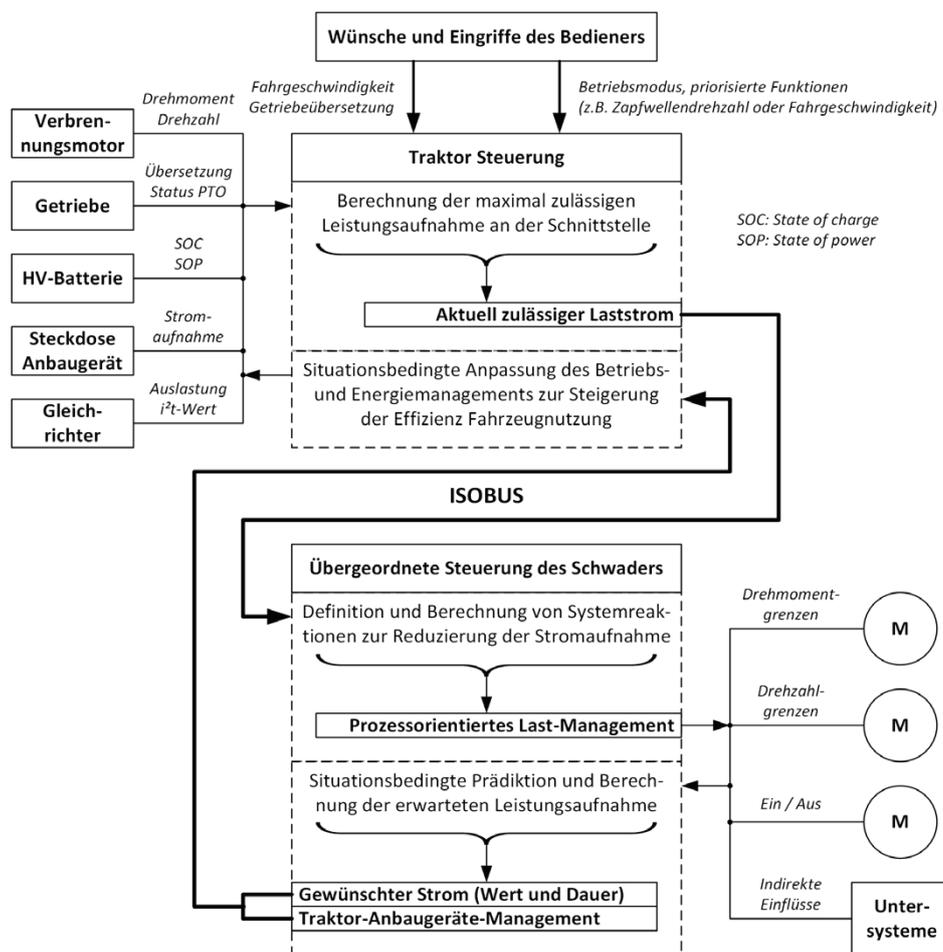


Abbildung 6: Schnittstellenübergreifende Lastbegrenzung und Lastprädiktion

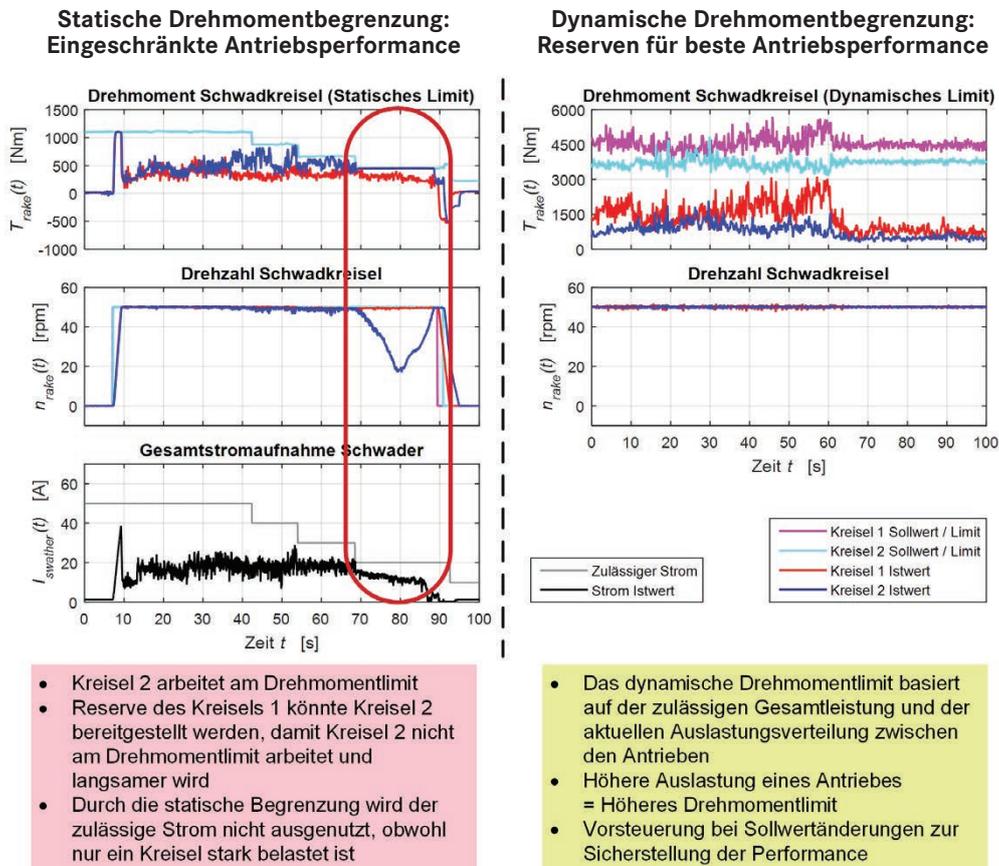


Abbildung 7: Erläuterung des dynamischen Lastmanagements am Beispiel zweier Schwadkreisel

nes Betriebs- und Energiemanagement für eine effektive Leistungsbereitstellung anpasst. Derartige Lastprädiktionen können z.B. Teil eines Vorgewendemanagements sein. Eine Integration dieser Informationsflüsse in weiterführende TIM-Strategien (Traktor-Implement-Management), insbesondere unter Einbezug der Fahrgeschwindigkeit, ist eine weitere Möglichkeit, um die Systemauslastung stets zu optimieren und den Bediener zu entlasten.

Die beschriebenen Signalflüsse zur Lastbegrenzung und Lastprädiktion werden zyklisch bzw. auf Anforderung ausgeführt. Aufgrund der Überlastfähigkeit elektrischer Systeme ist keine Echtzeitfähigkeit erforderlich, die Nutzung des bekannten und erprobten ISOBUS ist ausreichend. Während der Systeminitialisierung erfolgt im Zuge des Abgleichs der Leistungsanforderungen in jedem Fall eine Basisabsicherung gegenüber Spitzenströmen.

Die dargestellten Lösungsansätze für den Überlastschutz und die Lastprädiktion sind allgemeingültig, z.B. ist auch der über die Zeit zunehmende Leistungsbedarf beim Pressen eines Rundballens vorhersehbar. Gemeinsam mit den Vorschlägen für eine dreistufige Systemidentifikation, -initialisierung und Ausfallüberwachung des ISOBUS (TETZLAFF 2014), wurden sie zu einer wichtigen Diskussionsgrundlage der gegenwärtig stattfindenden Gespräche zur herstellerübergreifenden System- und Schnittstellenspezifikation in der Projektgruppe 7 „High Voltage“ der AEF (Agricultural Industry Electronics Foundation). Die Funktionsmuster nutzen gegenwärtig proprietäre Signale und Botschaften.

## Weitere Ergebnisse der Erprobung im Feldeinsatz

Mit Beginn der Inbetriebnahme des elektrischen Schwaders im Jahr 2013 und des Hybridschleppers im Jahr darauf wurden umfangreiche Funktionsversuche durchgeführt. Der Schwader wurde sowohl mit einem Zapfwellengenerator als auch mit dem Schlepper eingesetzt. Damit konnten bei Bedarf gegenseitige Abhängigkeiten im Entwicklungsprozess aufgelöst werden. Des Weiteren ergab sich die Möglichkeit, das Schnittstellenkonzept mit zwei Systemkonfigurationen zu erproben. Der Schwader kann ohne Umbauten mit beiden Energiequellen betrieben werden, lediglich der Umfang softwareseitiger Schnittstellenfunktionen (Lastprädiktion, TIM) ist beim Zapfwellengenerator eingeschränkt. Weil allerdings das Lastmanagement vollständig auf dem Anbaugerät implementiert ist und ausgeführt wird, bleibt diese Funktion, und damit ein wichtiger Vorteil elektrischer Antriebstechnik, weiter erhalten.

Die bisherigen Maschineneinsätze erfolgten unter diversen Umgebungsbedingungen. Neben Funktionserprobungen wurden auch Dauereinsätze durchgeführt. Auch bei hohen Außentemperaturen arbeiteten die Systeme und Komponenten störungsfrei, trotz der vor allem beim Schwader eingesetzten Industriekomponenten. Durch die automatische, kreiselpositionsabhängige Antriebsabschaltung können durch den Kreisstillstand – je nach Gegebenheiten auf dem Feld – Energieeinsparungen von etwa 8 % (Schwaddlänge 200 m, Wendezeit 20 s) im Vorgewende erzielt werden. Zwangsläufig steigt das Einsparungspotenzial bei kurzen Parzellenlängen und hohen Wendeanteilen. Da der Kreiselaushub in der Regel sequentiell oder zumindest gestaffelt erfolgt, wird die anfallende Bremsenergie über den gemeinsamen Zwischenkreis den anderen Kreislern zur Verfügung gestellt. Auch bei Nutzung des Zapfwellengenerators (ohne Hochvolt-Speicher) wird dem System, mit Ausnahme von Verlusten, somit keine Antriebsleistung entzogen.

Ein weiteres Projektziel – neben der allgemeinen System- und Funktionserprobung – ist die Untersuchung der Besonderheiten einer Hybridisierung. Ein Energiespeicher im Schlepper hat dabei zwei wesentliche Vorteile für die Entwicklungsarbeit (Abbildung 8):

- Vorhandensein einer Testumgebung zur Auslegung, Optimierung und Regelung ungepufferter Zwischenkreise durch „Einfrieren“ des SOC (State of charge).
- Anwendungsspezifische Hybridisierungspotenziale und entsprechende Energie- und Betriebsstrategien können identifiziert und erprobt werden.

In Abbildung 8 ist durch die blauen Kurven ein Betrieb mit fixem Batterie-SOC dargestellt. Nach dem anfänglichen Laden auf einen Zielwert wird dieser während des folgenden Arbeitsprozesses konstant gehalten, d.h. der Batteriestrom wird zu null geregelt. Das Verhalten entspricht damit einem nichthybriden Fahrzeug. Es ist erkennbar, dass durch starke Lastschwankungen trotzdem verbleibende Batteriestrome auftreten. Diese Energieflüsse stellen anwendungsspezifische Informationen zum Entwurf und der Auslegung des Zwischenkreises bzw. dessen Regelung für einen elektrifizierten Schlepper ohne Hochvolt-Speicher dar. Für ein stabiles Fahrverhalten eines nichthybriden Schleppers müssen diese Energiemengen durch den Zwischenkreis bereitgestellt werden.

Für den gleichen Lastzyklus verdeutlichen die roten Kurven die zielgerichtete Nutzung der HV-Batterie zur Betriebspunktverschiebung und Phlegmatisierung des Verbrennungsmotors. Es ist zu erkennen, dass sich für den Schwadprozess und das real aufgebaute System Betriebsparameter bestimmen lassen, mit denen sich der Dieselmotor stationär mit konstanter Energieabgabe und die HV-Batterie in einem unkritischen SOC-Bereich betreiben lassen. Als Offset zur Grundlast des Verbrennungsmotors wird die primär durch den Arbeitsprozess hervorgerufene Lastcharakteristik durch

die Batterie bereitgestellt. Im Vorgewende und während eines Feldwechsels wird die Batterie geladen, zur übrigen Zeit entladen. Wie im Bereich um 600 s zu erkennen ist, sind insbesondere bei kurzen Parzellenlängen die Vorgewendeweiten ausreichend, um den Ladezustand auf einem quasistationären Niveau zu halten. Mit derartigen Analysen ergibt sich die Chance, abhängig von gewissen Randbedingungen und Benutzervorgaben zu Feld und Erntegut, verschiedene Hybrid- und Betriebsstrategien in die Maschine und die Schlepper-Geräte-Kombination zu implementieren.

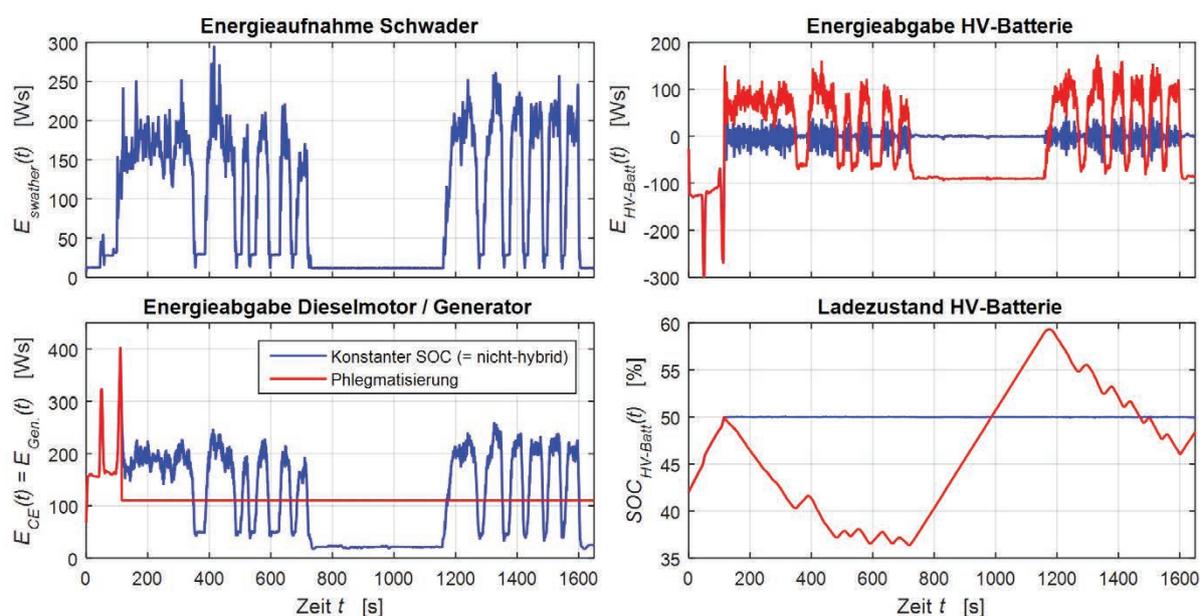


Abbildung 8: Betrieb des Schleppers mit fixem SOC und daraus abgeleitete Hybridstrategie

## Schlussfolgerungen

Die elektrifizierten Funktionsmuster sind nach dem aktuellen Stand der Technik aufgebaut und haben ihre Funktionstüchtigkeit in Feldtests unter Beweis gestellt. Wie dargestellt wurde, bietet die Elektrifizierung sowohl im Schwader als auch im Schlepper Vorteile. Von besonderer Bedeutung ist jedoch die schnittstellenübergreifende Betrachtungsweise. Die Gleichspannungsschnittstelle bietet Vorteile gegenüber der Wechselspannungsübertragung, nicht zuletzt durch die klare Zuweisung der Verantwortlichkeiten für das Energiemanagement und das prozessorientierte Lastmanagement. Die Kommunikation findet über den bekannten ISOBUS statt. In den Fahrzeugen sind auf die elektrische Antriebstechnik hin gezielt entwickelte Strategien zum Überlastschutz und der Lastprädiktion realisiert und getestet, die auch zum Diskussionsgegenstand der Standardisierungsbestrebungen der AEF geworden sind. Durch die Hybridisierung lassen sich die Betriebs- und Funktionsstrategien deutlich erweitern, aber auch nicht-hybride Systeme zielgerichtet weiter entwickeln.

In gegenwärtig stattfindenden Untersuchungen wird der Systemwirkungsgrad des Schwaders gegenüber dem einer vergleichbaren Maschine herkömmlicher Bauart ermittelt. Die ersten Ergebnisse zeigen, wie erwartet, eine höhere Systemeingangsleistung, bei jedoch deutlich gesteigertem Nutzwert, erhöhtem Bedienkomfort und enormen Automatisierungs- und Vernetzungspotenzialen innerhalb des Geräts und im Maschinenverbund. Diese werden im Zuge weiterer Untersuchungen zum Hybrid- und Traktor-Implement-Management ausgebaut und weiter erprobt.

## Literatur

- AGCO Fendt; John Deere (2011): Implement connection. In: 2. Kolloquium Elektrische Antriebe in der Landtechnik, 5.-6.7.2011, Wieselburg, Tagungspräsentation, unveröffentlicht
- Baldinger, M. (2011): Anforderungen an elektrische Antriebstechnik aus der Sicht eines Anbaugeräteherstellers. In: 2. Kolloquium Elektrische Antriebe in der Landtechnik, 5.-6.7.2011, Wieselburg, Tagungspräsentation, unveröffentlicht
- Breu, W. (2014): Electrification at AGCO/Fendt – Lessons Learned. In: 5. Kolloquium Elektrische Antriebe in der Landtechnik, 1.-2.7.2014, Dresden, Tagungspräsentation, unveröffentlicht
- CLAAS (2010): EP 2 305 021 A1, S. Loebe
- DIN ISO 6469-3:2011-12 (2011): Elektrisch angetriebene Straßenfahrzeuge – Sicherheitsspezifikation – Teil 3: Schutz von Personen gegen elektrischen Schlag. Berlin, Beuth Verlag
- DIN ISO/FDIS 16230-1 (2015): Landmaschinen und Traktoren – Sicherheit von elektrischen und elektronischen Bauteilen und Systemen mit höherer Spannung – Teil 1: Generelle Anforderungen. Normentwurf, Berlin, Beuth Verlag
- DIN VDE 0100-410:2007-06 (2007): Errichten von Niederspannungsanlagen – Teil 4-41: Schutzmaßnahmen – Schutz gegen elektrischen Schlag (IEC 60364-4-41:2005, modifiziert); Deutsche Übernahme HD 60364-4-41:2007. Berlin, Beuth Verlag
- Eckermann, E. (2015): Über die Elektrizität auf Landwegen. Bundesverband eMobilität e. V., <http://www.bem-ev.de/uber-die-elektricitat-auf-landwegen>, Zugriff am 23.3.2015
- Europäische Union (EU) (2003): Richtlinie 2003/37/EG über die Typgenehmigung für land- oder forstwirtschaftliche Zugmaschinen, ihre Anhänger und die von ihnen gezogenen auswechselbaren Maschinen sowie für Systeme, Bauteile und selbstständige technische Einheiten dieser Fahrzeuge und zur Aufhebung der Richtlinie 74/150/EWG. ABl. L 171, 9.7.2003, p. 1–80
- Europäische Union (EU) (2006): Richtlinie 2006/42/EG über Maschinen und zur Änderung der Richtlinie 95/16/EG (Neufassung). ABl. L 157/24, 9.6.2006, p. 1–63
- Geißler, M.; Herlitzius, T. (2014): System evaluation method and conclusion of the tractor implement interface architecture. In: 5. Kolloquium Elektrische Antriebe in der Landtechnik, 1.-2.7.2014, Dresden, Tagungspräsentation, unveröffentlicht
- Herlitzius, T. (2010): VDI MEG Kolloquium Elektrische Antriebe in der Landtechnik, In: VDI MEG Kolloquium Elektrische Antriebe in der Landtechnik, 19.5.2010, Dresden, Tagungspräsentation, unveröffentlicht
- Heymann, P. (2015): Aufbau und Erprobung eines Hybridtraktors. In: 5. Fachtagung Hybride und energieeffiziente Antriebe für mobile Arbeitsmaschinen, 25.2.2015, Karlsruhe, S. 35–47
- International Harvester (1957): New! McCormick Farmall 450. Produktbroschüre CR-1391-G. 5-15, S. 27, <http://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?filename=0&article=1008&context=tractormuseum-lit&type=additional>, Zugriff am 23.3.2015
- Kraftfahrt-Bundesamt (2015): Bestand an Pkw in den Jahren 2006 bis 2015 nach ausgewählten Kraftstoffarten. [http://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Umwelt/b\\_umwelt\\_z.html](http://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Umwelt/b_umwelt_z.html), Zugriff am 23.3.2015
- Lindner, M.; Aumer W.; Geißler, M.; Herlitzius, T. (2011): Herausforderungen bei der Elektrifizierung von Geräten in der Landtechnik, In: 3. Fachtagung Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen, 20.2.2013, Karlsruhe, S. 107–115
- Tetzlaff, S. (2014): Interface for electrified tractor-implement-combinations, In: 5. Kolloquium Elektrische Antriebe in der Landtechnik, 1.-2.7.2014, Dresden, Tagungspräsentation, unveröffentlicht
- U.S. Census Bureau (2012): Table 1097. Alternative Fueled Vehicles and Estimated Consumption of Vehicle Fuels by Fuel Type: 2005-2009. In: Statistical Abstract of the United States, Section Transportation, p. 688
- Wilmer, H. (2007): Mit Spannung in die Zukunft. profi 12, S. 38

## **Autoren**

**Dipl.-Ing. (TU) Sebastian Tetzlaff** war Entwicklungsingenieur und Doktorand in der F&E, CLAAS Industrietechnik GmbH, Halberstädter Straße 15-19, 33106 Paderborn, E-Mail: sebastian.tetzlaff@yahoo.de

## **Hinweise**

Herrn Philipp Heymann danke ich für die Erlaubnis zur Nutzung seines Tagungsbeitrags (HEYMANN 2015) und, wie auch allen weiteren Projektbeteiligten, für die bisherige und zukünftige Zusammenarbeit.

Das Thema wurde auf der VDI-Tagung LAND.TECHNIK 2014, Berlin, 19.-20. November 2014, vorgestellt und eine Kurzfassung im VDI-Bericht (Bd. 2226, S. 145-150) veröffentlicht.