

Deutsche Bundesstiftung Umwelt DBU
An der Bornau 2
49090 Osnabrück



Maschinenfabrik Bernard Krone GmbH
Heinrich-Krone-Straße 10
48480 Spelle



Lehrstuhl für Agrarsystemtechnik
Technische Universität München
Am Staudengarten 2
85354 Freising



Technische Universität München

*Pressemitteilung: **Elektrische Antriebe in selbstfahrenden Arbeitsmaschinen***
(DBU AZ 23326)

Einleitung

Durch veränderte Rahmenbedingungen werden zukünftig an die Antriebstechnik mobiler landwirtschaftlicher Arbeitsmaschinen wesentlich erweiterte Anforderungen gestellt werden. Neben konstruktiven Parametern wie Leistungsgewicht und Leistungsdichte werden dabei die Energieeffizienz und die Eignung zur Einbindung in ein Fahrzeugmanagementsystem wichtige Herausforderungen sein. Das nun abgeschlossene Projekt zeigt dieselektische Antriebstechnik als mögliche Alternative zu den aktuellen Lösungen auf und sichert die Einsetzbarkeit auch für den Bereich der Baugruppenantriebe in mobilen landwirtschaftlichen Erntemaschinen ab.

Methodischer Ansatz des Projekts

Auf Basis von in Feldversuchen gewonnenen Belastungsdaten für die typischerweise hydraulischen Baugruppenantriebe für Vorsatz und Einzug eines selbstfahrenden Feldhäckslers, wurde eine dieselektische Antriebslösung dimensioniert und als Prototyp in einem Versuchsträger realisiert. Dabei sind die beiden im geschlossenen hydraulischen Kreisen arbeitenden Pumpen für Vorsatz und Einzug durch einen zentralen, permanenterregten Synchrongenerator ersetzt. Seitens der Verbraucher ist der hydraulische Einzugsantrieb direkt gegen eine passende Elektromaschine getauscht, wohingegen der zentrale Vorsatzantrieb samt mechanischem Übertragungsstrang durch zwei direkt im Vorsatz montierte Motoren ersetzt ist. Dabei sind sowohl die als Antrieb eingesetzten

Reluktanzmotoren, als auch Generator und Leistungselektronik mit Wasserkühlung ausgeführt (Abb. 1; Abb. 2).

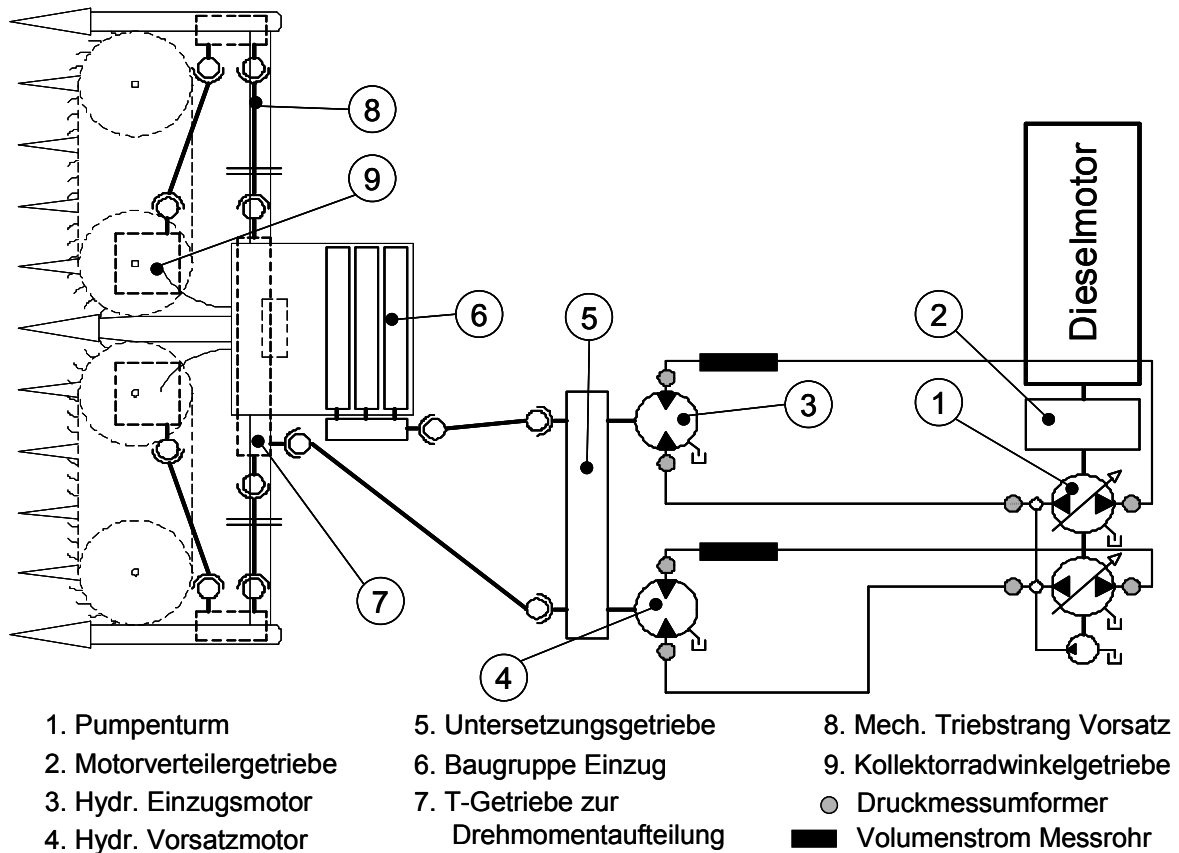


Abbildung 1: Schema des hydraulischen Serienantriebsstrangs für Vorsatz und Einzug am selbstfahrenden Feldhäcksler Krone Big X

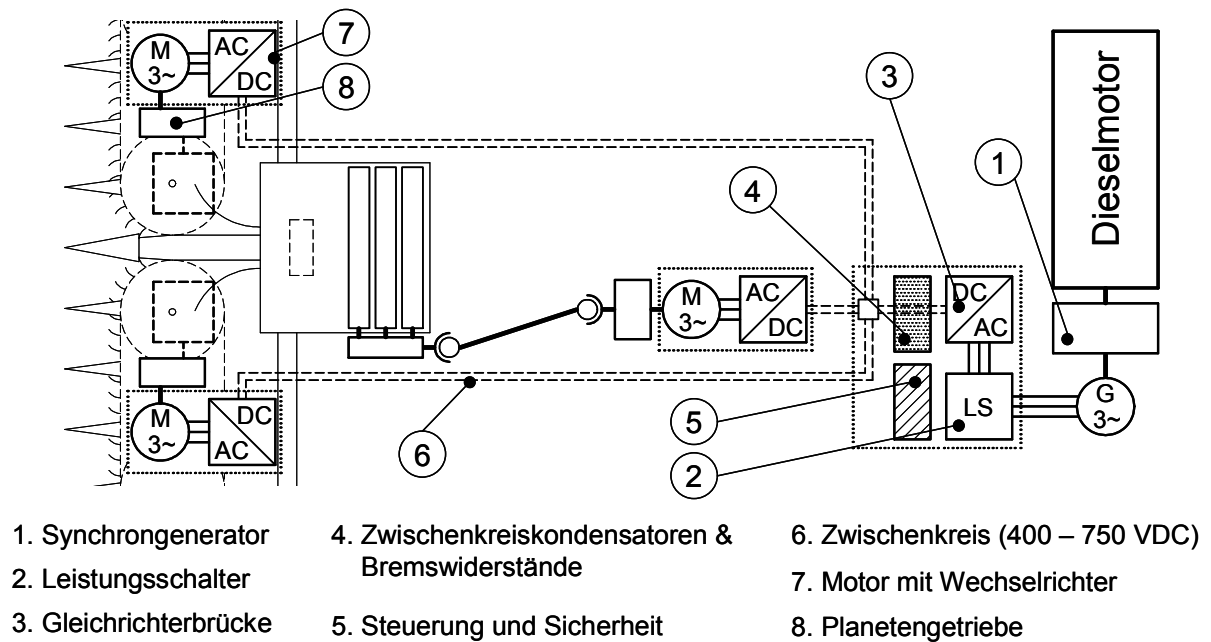


Abbildung 2: Dieselelektrischer Prototyptriebstrang für Vorsatz und Einzug an einem Krone Big X Feldhäcksler (dargestellt ohne Kühlsystem)

Neben der Dimensionierung des dieselektrischen Triebstrangs dienen die Belastungsdaten aus den Feldversuchen zusätzlich dazu, ein typisches Drehmoment- und Drehzahlspektrum für beide Baugruppen abzustecken und den häufigsten Betriebspunkt zu definieren. Für die Bewertung können so für beide Antriebslösungen die Wirkungsgrade an typischen stationären Betriebspunkten bei unterschiedlicher Auslastung und Drehzahl verglichen werden.

Zusätzlich dokumentieren die Daten auch den typisch dynamischen Einsatzfall. Über eine erweiterte Monte-Carlo Methode werden die typischen Betriebszustände in dynamische Prüfzyklen übertragen. Diese repräsentieren damit statistisch die Häufigkeit und Abfolge der Betriebspunkte der Baugruppen und deren Wechselwirkungen untereinander. Auf Basis dieser Prüfroutinen wird die Energieeffizienz beider Antriebslösungen für typische Einsatzzyklen am Prüfstand reproduzierbar dokumentiert. Als Einflussparameter werden Auslastung, theoretische Häcksellänge und Dieselmotordrehzahl variiert. Um den Bezug zur Maschine zu erhalten, bestimmt sich die Baugruppendrehzahl sowohl für die stationären als auch die dynamischen Untersuchungen aus der Drehzahl des Dieselmotors und der vom Fahrer vorgegebenen theoretischen Häcksellänge. Neben diesem Einfluss auf die Solldrehzahl der Baugruppen wirkt sich die Dieselmotordrehzahl auch über die proportional schwankende Zwischenkreisspannung direkt auf den Triebstrangwirkungsgrad aus.

Ergänzend zu den hydraulischen Feldversuchen im Herbst 2006 rundeten Feldversuche mit der dieselektrischen Antriebslösung das Projekt ab und erlauben einen Vergleich des Betriebsverhaltens.

Ergebnisse im Projekt

Diese Feldversuche zeigen deutliche Vorteile seitens der elektrischen Antriebstechnik durch die Drehzahlregelung der Baugruppen auf. Die für die hydraulische Lösung typischen Drehmomentüberhöhungen beim Anschalten und Beschleunigen der Baugruppen sind so zu eliminieren. Der geregelte Betrieb am Frequenzumrichter birgt gleichzeitig den weiteren Vorteil, dass zur Motorführung am Wechselrichter Prozessparameter wie anliegendes Drehmoment oder Drehzahl vorhanden sind und so auch für ein Fahrzeugmanagementsystem zur Verfügung gestellt werden können.

Die Versuchsreihen zu den Wirkungsgraden an stationären Betriebspunkten offenbaren weitere Vorteile der elektrischen Antriebstechnik gegenüber der Hydraulik.

Wirkungsgrade der hydraulischen und elektrischen Komponenten

Das Verhalten der hydraulischen und elektrischen Wandler bei Volllast und Teillast ist in Tabelle 1 zusammengestellt. Es wird deutlich, dass auf der motorischen Seite die Unterschiede nur gering ausgeprägt sind. Der Wirkungsgrad des elektrischen Einzugsantriebs ist bei voller Auslastung um 1,5 %, unter Teillast um 2,7 % höher als der hydraulische

Vergleichswert. Die Werte für den elektrischen Vorsatzantrieb sind nicht zu differenzieren. Für den Gesamtwirkungsgrad des Strangs entscheidend sind die deutlich besseren Wirkungsgrade der elektrischen Leistungsbereitstellung im Vergleich zur hydraulischen. Hier sind unter Vollast Steigerungen um knapp 15 % dokumentiert. Unter Teillast steigen diese auf knapp 28 % an. Dies ist begründet durch die geringe Lastabhängigkeit der elektrischen Lösung, welche der Gradient $\Delta\eta_{10\%}$ zu 0,32 quantifiziert. Dieser beschreibt linearisiert um wie viele Prozentpunkte sich der Wirkungsgrad der Komponente bei Schwanken der Last um 10 % verändert.

Tabelle 1: Gegenüberstellung des Wirkungsgradverhaltens der hydraulischen und elektrischen Triebstrangkomponenten

		hydraulische Lösung	elektrische Lösung	Veränderung
Leistungsbereitstellung	η_{Teillast}	0,723	0,925	+27,9 %
	η_{Vollast}	0,792	0,941	+14,9 %
	$\Delta\eta_{10\%}$	1,38	0,32	-76,8 %
Vorsatz	η_{Teillast}	0,747	-	-
	η_{Vollast}	0,814	-	-
	$\Delta\eta_{10\%}$	1,31	-	-
Einzug	η_{Teillast}	0,847	0,870	+2,7 %
	η_{Vollast}	0,884	0,897	+1,5 %
	$\Delta\eta_{10\%}$	0,82	0,52	-36,0 %

Neben den direkten Wirkungsgradvorteilen zeigt die Zusammenstellung auch Vorteile geringerer Lastabhängigkeit für die elektrischen Komponenten auf. Der Vergleich der Antriebe ergibt eine um 36 %, der der Leistungsbereitstellung eine um 76 % geringere Lastabhängigkeit. Diese erlaubt eine gute Energieausnutzung in Teillastsituationen, wie sie bei Erntemaschinen häufig vorkommen.

Wirkungsgrade des hydraulischen und elektrischen Gesamttriebstrangs

Die Gesamtwirkungsgrade des hydraulischen und elektrischen Triebstrangs zeigen grundsätzlich ähnliche Tendenzen, allerdings auf deutlich unterschiedlichem Niveau. Beide arbeiten unter Last erwartungsgemäß effektiver als im Leerlauf, allerdings kann durch die weitaus geringeren Verluste der elektrischen Leistungsbereitstellung der Gesamtwirkungsgrad in der dieselektrischen Lösung deutlich verbessert werden.

Unter typischen Einsatzbedingungen (Dieselmotordrehzahl $n_{\text{Diesel}}=1750$ 1/min, theoretische Häcksellänge $x_{\text{th}}=8$ mm) liegt der Gesamtwirkungsgrad des elektrischen Triebstrangs dabei unter Vollast mit 84,9 % um 16,9 Prozentpunkte über dem des hydraulischen. Aus Sicht der

Hydraulik entspricht dies einer Steigerung um knapp 25 %. Bei gleichem energetischem Aufwand kann effektiv knapp ein Viertel mehr geleistet werden. Die Verluste werden damit von 20,5 kW um 58,5 % auf 8,4 kW reduziert. Dabei nehmen mit sinkender Auslastung die Vorteile weiter zu, da die nachteilige Lastabhängigkeit der Hydraulik stärker ausgeprägt ist. Bei einer Auslastung von 50 % erhöht sich der Vorteil auf 23,4 Prozentpunkte. Der elektrische Strang arbeitet dabei immer noch mit einem Wirkungsgrad von 81,4 %. Abbildung 3 zeigt die Wirkungsgradvorteile des elektrischen Triebstrangs im Vergleich zur hydraulischen Serienlösung für unterschiedliche Auslastungen und Dieselmotordrehzahlen.

Tendenziell wachsen bei allen Laststufen mit zunehmender Dieselmotordrehzahl die Vorteile des elektrischen Triebstrangs an. Allerdings schrumpft dieser Vorteil mit zunehmender Auslastung. Gleichzeitig ist der Effekt bei geringen Dieselmotordrehzahlen schwächer ausgeprägt. Bei einer Drehzahl von 1500 1/min reduziert sich der Vorteil durch eine höhere Auslastung von 14,2 % auf 13,4 %. Bei der hohen Dieselmotordrehzahl von 1850 1/min hingegen erfolgt eine Reduktion von 31 % auf 15,3 %. Diese beschriebenen Trends werden im Bereich geringer Last bei einer Dieselmotordrehzahl von 1600 1/min allerdings unterbrochen. Hier hat die Auslastung keinen Effekt.

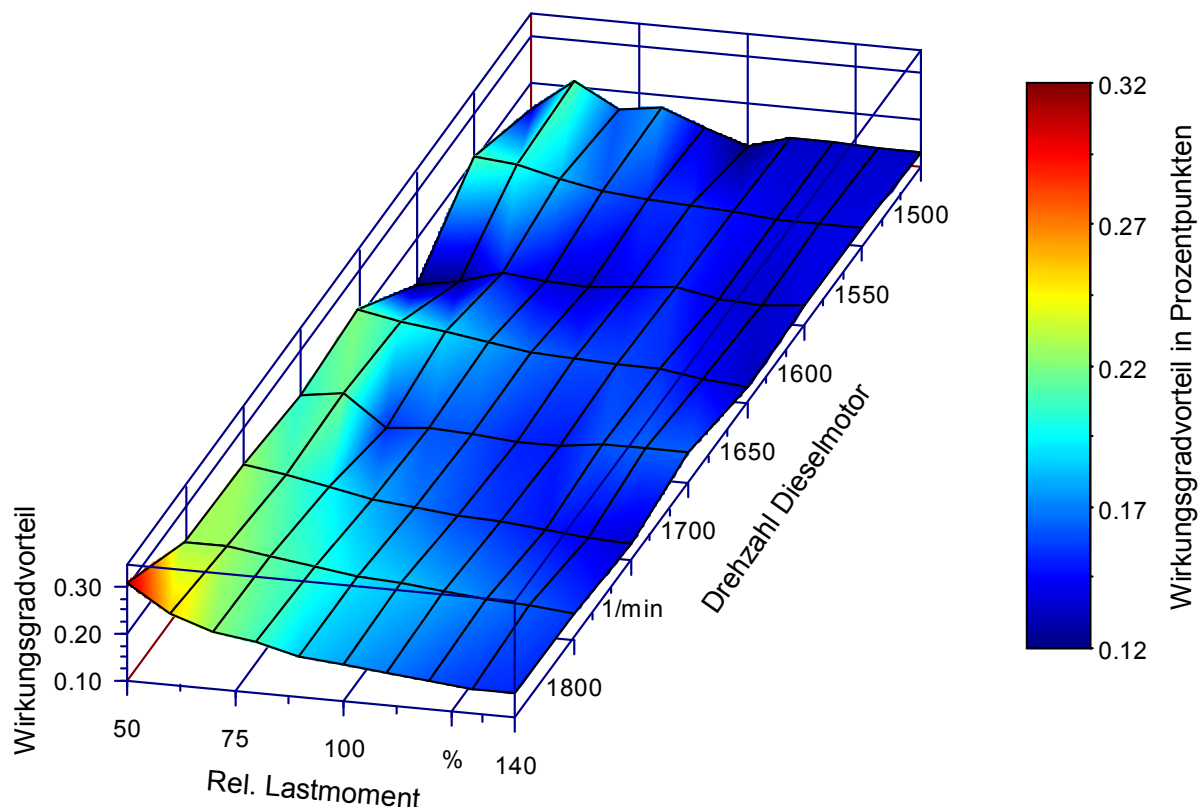


Abbildung 3: Wirkungsgradvorteil des elektrischen Triebstrangs gegenüber dem hydraulischen unter stationären Betriebsbedingungen bei unterschiedlicher Dieselmotordrehzahl und Auslastungen zwischen 50 % und 140 % am Einzugsmotor ($x_{th}=8$ mm)

Zusammenfassend kristallisieren sich Vorteile der Elektrik insbesondere für den Bereich mit hoher Dieselmotordrehzahl und Teilauslastung heraus. Damit sind die Einsparungseffekte besonders ausgeprägt für den Fall, dass die Maschine nicht voll ausgelastet wird und durch den Fahrer nicht unter Drückung gefahren werden kann.

Energieeffizienz des hydraulischen und elektrischen Antriebssystems

Im Unterschied zu dem obig betrachteten stationären Wirkungsgradverhalten, erlaubt die Energieeffizienzbetrachtung hingegen eine Spezifizierung auf den maschinen- und verfahrenstypischen Einsatzzyklus mit dynamischen Belastungen. Abbildung 4 zeigt die Energieeffizienz des hydraulischen und elektrischen Antriebsstrangs während typischer dynamischer Belastungen im Leerlauf und bei mittleren Auslastungen zwischen 50% und 140%.

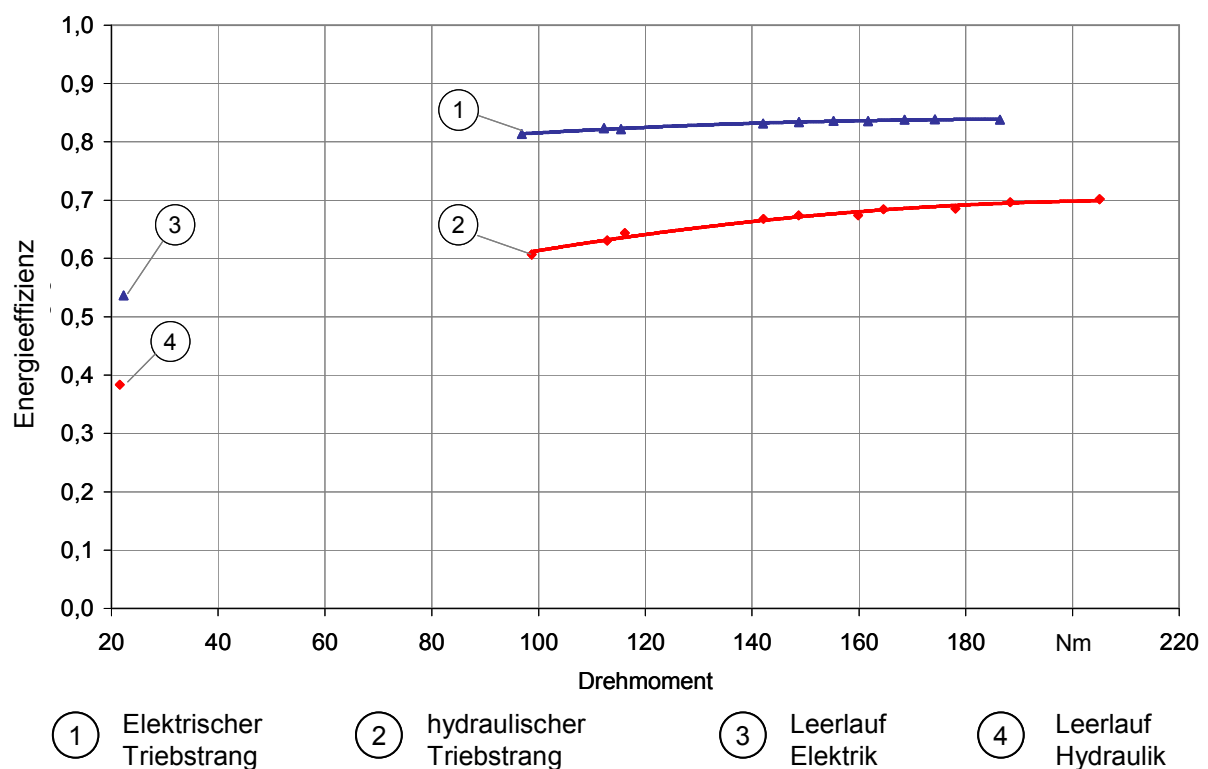


Abbildung 4: Energieeffizienz des elektrischen und hydraulischen Triebstranges bei unterschiedlicher dynamischer Auslastung ($n_{\text{Diesel}}=1750 \text{ 1/min}$, $x_{\text{th}}=8 \text{ mm}$)

Es wird deutlich, dass durch Einsatz dieselektrischer Triebstränge die Verluste unter Last etwa halbiert werden können. Unter Vollast arbeitet der elektrische Triebstrang um 16,2 Prozentpunkte effizienter als der hydraulische. Im Teillastbetrieb steigert sich dies auf über 20 Prozentpunkte. Auch für den Leerlaufwirkungsgrad ist durch die effizientere Leistungsbereitstellung ein Vorteil für die dieselektrische Lösung von 15 Prozentpunkten zu verbuchen.

Unter den gemessenen Zeitanteilen von Last- und Leerlaufphasen im Erntezyklus resultiert damit für den typischen Einsatz eine Zykleneffizienz bei voller Auslastung von 79,3 % seitens der dieselektrischen Lösung und 64,0 % seitens der hydraulischen Lösung. Bei halber Auslastung im Zyklus erhöht sich der Vorteil weiter auf knapp 20 Prozentpunkte.

Leistungsgewicht und Leistungsdichte

Neben der Effizienz der Antriebstechnik sind für einen Anwender insbesondere auch der Bauraum und das Installationsgewicht ausschlaggebend.

Der wesentliche Nachteil für die dieselektrische Lösung ist dabei durch die hier im Durchschnitt um den Faktor 3,9 größeren Antriebsmodule bedingt. Dadurch wird die freie Platzierbarkeit deutlich eingeschränkt. Der Generator als Teil der elektrischen Leistungsbereitstellung bietet hingegen im Vergleich zu den hydraulischen Pumpen eine kompaktere Bauform mit zudem wesentlich weniger Anschlussleitungen. Allerdings ist zusätzlich der Schaltschrank mit Gleichrichterbrücke notwendig, der aber frei positioniert werden kann.

Als Erfahrung aus dem Projekt ist anzumerken, dass der gesamte dieselektrische Triebstrang unter den bestehenden Abdeckungen der Maschine ohne große Änderungen integriert werden konnte.

Weniger kritisch als erwartet stellt sich die Gesamtbilanz der Leistungsgewichte des hydraulischen und elektrischen Triebstrangs dar. Trotz der um den Faktor 3 schwereren Wandler (bei elektrischer Leistungsbereitstellung Generator mit Schaltschrank berücksichtigt) und des zusätzlichen Kühlsystems für den dieselektrischen Triebstrang, liegt das Gewicht des Gesamtstrangs im Vergleich zur hydraulischen Lösung nur um 124 kg höher. Damit steigt das Leistungsgewicht von 14,1 kg/kW seitens der hydraulischen Lösung auf 17,2 kg/kW für die elektrische Alternative.

Für einen Serieneinsatz der elektrischen Antriebe deutlich nachteiliger ist der zusätzliche Verschlauchungsaufwand für die Flüssigkühlung sowie die zusätzliche Anbindung der Motoren an ein BUS-Leitung und eine Drehzahlollwertvorgabe. Diese erhöhen den Montageaufwand für das System deutlich und stellen im Produktionsprozess eine zusätzliche Fehlerquelle dar. Gleichzeitig können im Betrieb Schäden an diesen Leitungen durch Scheuern oder Klemmen entstehen.

Ausblick:

Die sehr deutlich ausgeprägten Vorteile der elektrischen Antriebslösung bezüglich des Wirkungsgrads und der energetischen Ausnutzung werden zukünftig deren Bedeutung auch im mobilen Bereich steigern. Der Einsatz als Baugruppenantrieb eröffnet je nach

Maschinentyp hohe Einsparpotenziale. Entfallen im Feldhäcksler nur ca. 30 % auf hydraulische Antriebstechnik, so sind im selbstfahrenden Rübenroder diese Potenziale auf annähernd den gesamten Antriebsstrang zu übertragen.

Limitierend wirkt das für den Gesamtstrang um knapp 22 % höhere Leistungsgewicht der elektrischen Lösungen, wenn auf verfügbare Serienkomponenten zurückgegriffen wird. Hoch spezialisierte und hoch integrierte Ansätze, wie seitens der Automobiltechnik für Hybridantriebe eingesetzt, können diesen Nachteil kompensieren. Allerdings schränken die deutlich kleineren Stückzahlen der Landtechnikbranche die Möglichkeiten einer ökonomisch sinnvollen Spezialisierung erheblich ein. Daher ist zu erwarten, dass ähnlich der Hydraulik Systemlieferanten elektrische Komponenten in modularen Baureihen für den mobilen Einsatz entwickeln und anbieten werden. Seitens der Hersteller gilt es Interesse zu bekunden und sinnvolle Abstufungen und Modulgrößen zu definieren.

Bezüglich des Leistungsgewichts und der Leistungsdichte ist allerdings darauf zu achten, dass die verbesserte Regelbarkeit und Versorgung aus einem zentralen Zwischenkreis hinsichtlich der Maschinenarchitektur deutliche Vorteile eröffnet. Im Unterschied zur Hydraulik, wo eine wirkungsgradoptimale Versorgung nur im geschlossenen Kreis mit optimal auf den Verbraucher abgestimmter Pumpe möglich ist, bedingt ein zentraler Zwischenkreis keine Verluste in der Leistungsübertragung oder Leistungsbereitstellung. Dies erlaubt einen Triebstrang mit einer zentral geführten Leistungsversorgung gemäß Abbildung 5.

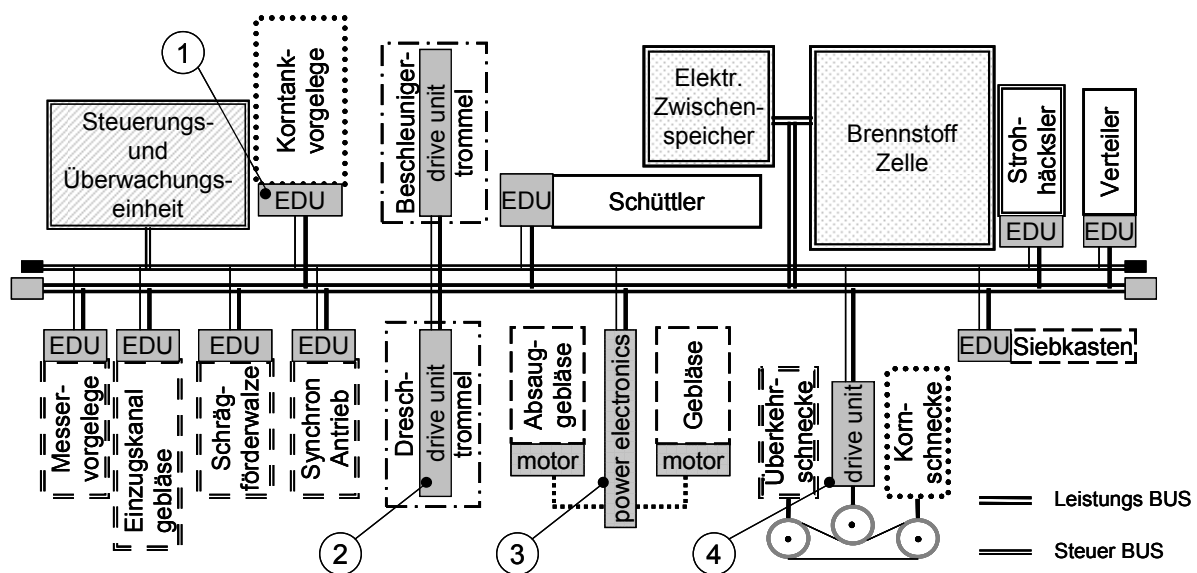


Abbildung 5: Mögliche Triebstrangarchitektur eines Mähdreschers bei zentraler elektrischer Leistungsverteilung

Dargestellt sind unterschiedliche Lösungsansätze, wobei die „Electric Drive Units“ EDU aus Motor und dezentralem Wechselrichter bestehen.

Mit geringstem Aufwand zu integrieren sind aufgesetzte, die aktuelle Lösung ersetzende Module. Dabei werden Riemenantriebe oder hydraulische Motoren durch elektrische ersetzt und an die Baugruppe angeflanscht (1). Wesentlicher Vorteil sind überschaubare Kosten und uneingeschränkte Zugänglichkeit für Reparatur und Wartung. Die Integration der Einheiten in die Baugruppe (2) erlaubt am Beispiel des Dreschwerks am gezeigten Mähdrescher eine Steigerung der effektiven Arbeitsbreite der Baugruppe. Diese ist heute als Schlüsselstelle zur weiteren Durchsatzsteigerung durch den beidseitig notwendigen Bauraum für die verwendeten Riemenantriebe begrenzt. Als Vorteil bieten diese hochintegrierten Lösungen eine Verbesserung des kritischen Leistungsgewichts, bei allerdings deutlich höheren Kosten.

Entsprechend der jeweils notwendigen Variabilität der Baugruppen ist außerdem der Dezentralisierungsgrad anzupassen. Für unabhängig zu steuernde Baugruppen sind dezentrale Lösungen mit aufgesetzter Leistungselektronik notwendig (1)(2). Zentrale Leistungselektronik (3) für mehrere Motoren ist sinnvoll, wenn Baugruppen unter vergleichbaren Leistungsanforderungen arbeiten. Das Reduzieren auf einen zentralen Antrieb (4) ist angezeigt, wenn Baugruppen nicht unabhängig drehzahlvariabel sein müssen.

Im Unterschied zur konventionellen Lösung reduziert die gezeigte Leistungsübertragung per Stichleitung den Montageaufwand und die Montagekosten. Gleiches gilt auch im Vergleich zu hydraulischen Antriebsstrukturen wie sie typischerweise in selbstfahrenden Rübenrotern eingesetzt sind. Die elektrische Verteilung mit dezentraler Leistungselektronik am Motor erlaubt es, die heute mehrfache Leitungsführung von den Pumpen ins Vorsatzgerät und zu den verbleibenden Verbrauchern in einer Energieschiene zu bündeln. Diese kann im zentralen Rahmenrohr montiert werden und ist damit gleichzeitig vor Beschädigungen gesichert. Dabei zu beachten ist allerdings, dass jede der abzweigenden Stichleitungen zu den Baugruppen einzeln gegen Kurzschluss abgesichert werden muss.

Um den geringeren Montageaufwand voll ausschöpfen zu können, bieten so genannte Hybridkabel heute die Möglichkeit die Leistungs- und Datenübertragungsleiter in einer Kabelummantelung zu vereinen. Eine Erweiterung dieser um Kühlmittleitungen reduziert den Montageaufwand zur Versorgung der Baugruppe auf eine Einzelleitung. Aus Sicht heutiger Maschinenkonfigurationen mit angetriebenen wechselbaren Vorsatzgeräten ist zusätzlich eine Steckmöglichkeit für Stichleitungen zum schnellen An- und Abkoppeln notwendig.