

Modellbasierte Effizienzbewertung von Mähdrescherfahrantrieben

Steffen Häberle, Stefan Böttinger, Steffen Mutschler

Im Rahmen von Untersuchungen des Antriebsstrangs von Mähdreschern werden an insgesamt zwei Versuchsmaschinen die Schwerpunkte Last- und Leistungsverteilung, Energieverbrauch und Einsatzverteilung detailliert erforscht. Ausgehend von den gewonnenen Erkenntnissen des Feldeinsatzes lassen sich nun anhand von modellbasierten Studien Energieeinsparpotenziale im Antriebsstrang des Mähdreschers quantifizieren. Darüber hinaus bietet der virtuelle Maschinenversuch die Möglichkeit, innovative Antriebsarchitekturen und Ansteuerlösungen unter reproduzierbaren Bedingungen zu vergleichen. Als Ergebnis wird eine Bewertungsmethodik vorgestellt und exemplarisch angewandt, welche es erlaubt, unter lokal repräsentativen Einsatzbedingungen, diese Vergleiche zu ziehen.

Schlüsselwörter

Mähdrescher, Fahrantrieb, Effizienz, Einsatzprofil, Simulation

Kostenoptimierte Fahrantriebe in Erntemaschinen haben dazu geführt, dass deren Effizienzpotenziale nicht vollständig ausgeschöpft werden (ANDERL 2013). Der zunehmende Trend in Forschung und Entwicklung zu elektrischen Antriebssträngen (GALLMEIER 2009) zeigt, neben der günstigen Steuer- und Regelbarkeit, auch eine Fokussierung der Entwicklungstätigkeit hinsichtlich Prozessoptimierung durch eine leichter zu realisierende Verstellung (WÖBKE 2014) und Kraftstoffeinsparung (GÖTZ 2013). Vor dem Hintergrund der „Europa 2020 Ziele“ der Europäischen Union (EUROPÄISCHE KOMMISSION 2015) und der Tatsache, dass die Betriebskosten von Arbeitsmaschinen maßgeblich vom Kraftstoffverbrauch abhängig sind (BÖTTINGER 2008), wird dieser Trend sowohl politisch als auch von der Nachfrage des Kunden verstärkt. Wegen der langen Amortisationszeiten elektrischer Antriebe (GALLMEIER 2009) und der fehlenden Expertise in Werkstätten (KARNER 2011) besteht jedoch aktuell die Notwendigkeit, hydraulische und mechanische Antriebssysteme zu optimieren und Energieeinsparpotenziale zu nutzen. Diese Systeme haben sich vor allem wegen der Möglichkeit zur aufgelösten Bauweise, der guten Steuer- und Regelbarkeit und der wettbewerbsfähigen Marktpreise in mobilen Arbeitsmaschinen etabliert (ANDERL 2013).

Die modellbasierte Effizienzbewertung bietet die Möglichkeit, bereits in der Entwicklung von Maschinen einzelne Antriebskonzepte im virtuellen Versuch zu bewerten. Somit lassen sich aktuelle und innovative Lösungen unter reproduzierbaren Bedingungen direkt vergleichen. Für solche Vergleiche ist eine Bewertungsmethodik notwendig, welche für die Optimierungsgrößen Effizienz und Performance einsatz- und anforderungsgerechte – also auf die Arbeitsweise der Maschine zugeschnittene – Antriebslösungen, hervorbringt.

Einsatzprofile als Basis für die Ermittlung von Energieeinsparpotenzialen

Um mobile Arbeitsmaschinen im Kontext ihres gesamten Aufgabenspektrums bewerten zu können, sind sogenannte Einsatzprofile erforderlich. Diese unterteilen den Gesamtmaschineneinsatz in Teilaufgaben, welche als Zeitanteile dargestellt werden. Mit diesen Einsatzprofilen lassen sich – bei detaillierter Systemkenntnis – zielorientiert Energieeinsparpotenziale auf Prozess-, Maschinen- und Komponentenebene quantifizieren. Beispielsweise bieten Komponenten mit hoher Verlustleistung, aber sehr geringen Zeitanteilen im Einsatzprofil, nur geringe Potenziale für die Verbesserung der Gesamtenergieeffizienz einer Maschine (FLECZORECK 2011).

Seit 2010 finden am Institut für Agrartechnik der Universität Hohenheim detaillierte Untersuchungen zur Last- und Leistungsverteilung im Mähdrescher statt (MÜLLER 2013b). Die aus den beiden Versuchsmaschinen „Claas Lexion 470 Montana“ sowie „Claas Lexion 750 Montana“ gewonnenen Lastkollektive und Einsatzprofile können jetzt zur Validierung der Fahrtriebsmodelle verwendet werden. Zur Modellbildung wird das Engineering-Tool „AMESim“ von Siemens verwendet. Abbildung 1 zeigt exemplarisch ein Einsatzprofil des Versuchsmähdreschers bei Dreschversuchen auf der Schwäbischen Alb während der Ernte 2014. Die aufgezeichneten Daten stammen aus dem Ernteeinsatz mit einem Umfang von ca. 110 ha. Strukturbedingt findet das Abtanken überwiegend am Feldrand statt. Aufgrund der schlechten Witterung und häufiger Unterbrechung des Druscheinsatzes durch Regen fallen die Stillstands- und Transferzeiten höher als erwartet aus. Die Teilaufgabe „Stillstand Straße“ beinhaltet neben den tatsächlichen Stillstandszeiten auch die Rüstzeit für das An- und Abkuppeln des Schneidwerks sowie Einstellungen bei nicht laufendem Dreschwerk. Einstellungen bei laufendem Dreschwerk, wie beispielsweise die Einstellung auf die Fruchtart, werden der Teilaufgabe „Stillstand Feld“ zugeschlagen. Werden die Zeitanteile entsprechend der Vorgaben des KTBL (KTBL 2012) zu Ausführzeit, Wegezeit, Warte- und Rüstzeit zusammengefasst, zeigt sich eine hohe Übereinstimmung mit der durchgeführten Befragung der DLG zum Nutzungsverhalten von Mähdreschern im Erntejahr 2012. Hierbei konnten die Daten von 115 Mähdreschern mit einer Gesamtdruschfläche von über 45.000 ha abgefragt werden (HÄBERLE 2014). Allerdings lässt diese grobe Untergliederung keinerlei Rückschlüsse auf die tatsächliche Untergliederung der Ausführzeit zu und soll deshalb nur zu Vergleichszwecken herangezogen werden.

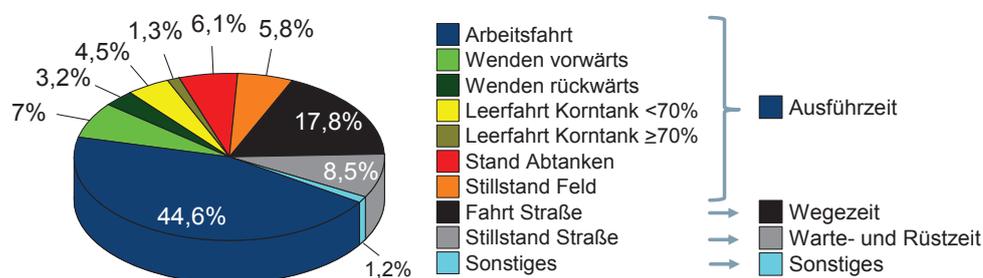


Abbildung 1: Einsatzprofil des Versuchsmähdreschers Claas Lexion 750 bei der Ernte 2014

Die Einsatzprofile der Versuchsmaschine werden bereits während des Druschs durch eine automatische Klassierung der Messdaten berechnet. Hierfür werden in Echtzeit die Daten des Maschinen-CAN-Bus, des Motor-CAN-Bus und eines zusätzlich installierten Mess-CAN-Bus ausgewertet. Somit ist jedem Zeitstempel im Messschrieb genau eine Teilaufgabe des Mähdreschers zugeordnet. Die

aus diesen Daten generierten Lastkollektive sind nach Aufgaben unterteilt und ermöglichen dadurch ein tieferes System- und Prozessverständnis. Durch Rekombination dieser Lastkollektive lassen sich andere regionspezifische Einsatzprofile durch die Gewichtung mit deren Zeitanteilen darstellen (MÜLLER 2013a). Somit ist die modellbasierte Effizienzbewertung nicht direkt an Messungen gekoppelt und lässt auch Aussagen über das Versuchsgebiet der realen Maschine hinaus zu.

Methodik zur modellbasierten Effizienzbewertung bei mobilen Arbeitsmaschinen

Die modellbasierte Effizienzbewertung mobiler Arbeitsmaschinen kann prinzipiell in zwei sich methodisch unterscheidende Bereiche gegliedert werden: die Simulation repräsentativer Arbeitspunkte und die Simulation vollständiger Arbeitszyklen. Die vergleichende Effizienzbewertung anhand von Arbeitszyklen ist besonders für Maschinen mit hohen dynamischen Anteilen im Bewegungs- und Lastverhalten geeignet (STURM 2012). Für eine repräsentative Bewertung werden daher anerkannte Referenzzyklen benötigt. Typische Beispiele aus dem Bereich der mobilen Arbeitsmaschinen sind der Y-Zyklus für Radlader und der 90°-Grabzyklus für Bagger. Bei Maschinen mit großen Zeitanteilen von quasistationären Betriebspunkten im Arbeitsprofil bietet die Simulation repräsentativer Arbeitspunkte wesentliche Vorteile im Bereich des Modellaufbaus und der Validierung.

Speziell bei Mähdreschern existieren derzeit keine Referenzzyklen. Dies ist vor allem auf die enorme Varianz der Parameter zurückzuführen, welche das Bewegungs- und Belastungsverhalten des Mähdreschers maßgeblich beeinflussen. Hier sind besonders Schlaggröße und -form, Bestandsdichte, Gutfeuchte, Bodenfeuchte und -art, Topografie, Fahrstrategie und Hof-Feld-Entfernung zu nennen. Die Simulation einzelner Arbeitspunkte bietet hier den Vorteil, dass nicht für jede Region und jeden Einsatzfall, die bewertet werden sollen, ein eigener Zyklus erarbeitet werden muss. Vielmehr ist es in der Gesamtbewertung der Maschineneffizienz ausreichend die Gewichtung der Zeitanteile der einzelnen Last- und Leistungspunkte entsprechend dem Einsatzprofil und den regionalen Gegebenheiten anzupassen.

MUTSCHLER (2008) empfiehlt als Methodik zur Effizienzbewertung am Beispiel eines Radladers die kumulierte Darstellung des Volllastwirkungsgrades über der Fahrzeuggeschwindigkeit, gewichtet mit den Zeitanteilen aus dem Geschwindigkeitskollektiv. Diese Methode soll anhand Abbildung 2 näher erläutert werden. Im ersten Schritt ① wird der Volllastwirkungsgrad des zu untersuchenden Triebstrangs mittels eines validierten Modells simuliert. Dazu werden für vorgegebene Geschwindigkeiten quasistationäre Volllastpunkte im Modell angefahren und analysiert. Der zweite Schritt ② umfasst die Bestimmung und Festlegung des Geschwindigkeitskollektivs für die zu analysierende Aufgabe der mobilen Arbeitsmaschine. Anschließend ③ wird für jede simulierte Geschwindigkeit der ermittelte Wirkungsgrad mit der Häufigkeit aus dem Geschwindigkeitskollektiv gewichtet. Dieser gewichtete Wirkungsgrad lässt sich im vierten Schritt ④ kumuliert über der Geschwindigkeit darstellen.

Formal drückt sich dieses Vorgehen gemäß Gleichung 1 aus. Der Laufindex i bezeichnet dabei die Klassen des Geschwindigkeitskollektivs:

$$\eta_{kum,volllast} = \sum_{i=1}^m \eta_{volllast,i} \cdot \frac{t_{v,i}}{t_{v,ges}} \quad (\text{Gl. 1})$$

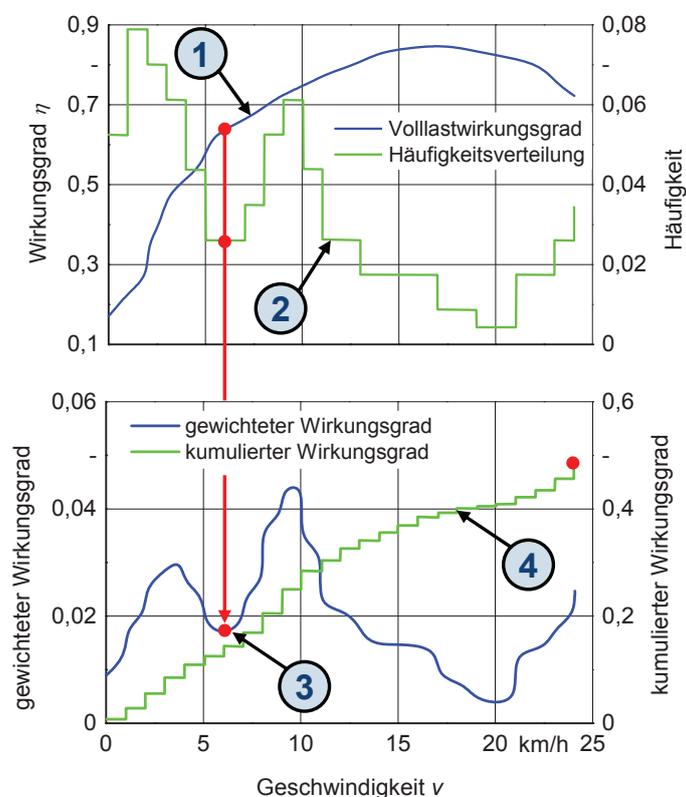


Abbildung 2: Methodik zur Effizienzbewertung durch geschwindigkeitsabhängige Gewichtung quasistationärer Vollastpunkte (nach MUTSCHLER 2008)

Als Ergebnis dieser Bewertung kann das Maximum der kumulierten Darstellung als Vergleichsziffer herangezogen werden. Damit können einzelne Antriebs- oder Ansteuerlösungen hinsichtlich ihrer Effizienz für eine konkrete Arbeitsaufgabe verglichen werden. Darüber hinaus zeigt der gewichtete Wirkungsgrad die Energieeinsparpotenziale der einzelnen Antriebslösungen im relativen Vergleich für jeden Geschwindigkeitsbereich. Ein höherer Maximalwert des kumulierten Wirkungsgrades sagt zwar aus, dass ein Antrieb für die untersuchte Aufgabe prinzipiell besser geeignet ist, jedoch impliziert dies nicht, dass dieser für den kompletten Geschwindigkeitsbereich die Optimallösung darstellt.

Diskussion der Bewertungsmethodik für Mähdrescherfahrantriebe

Die Vorteile der Bewertungsmethodik nach MUTSCHLER liegen klar auf der Hand:

- Der virtuelle Maschinenversuch wird als Werkzeug für die Effizienzbewertung verwendet. Dadurch lassen sich auch innovative Konzepte, welche noch nicht real existieren, unter reproduzierbaren Bedingungen vergleichen. Effizienzrelevante Arbeitsbereiche, also Bereiche mit hohen Zeitanteilen, werden durch die Gewichtung mit dem Geschwindigkeitskollektiv besonders berücksichtigt. Somit ist eine Analyse unter einsatzgerechten Bedingungen möglich.
- Die Simulation quasistationärer Betriebspunkte zur Effizienzbewertung bietet gegenüber transienten Rechnungen erhebliche Zeitvorteile bei der Berechnung und Validierung. Zum einen werden nur eingeschwungene Zustände und keine Übergänge betrachtet. Die transiente Simulation setzt dagegen eine exakte Nachbildung der Steuer- und Regelalgorithmen sowie der Systemdynamik vor-

aus. Denn eine exakte Systemkenntnis ist für eine hinreichend genaue Abbildung des Realsystems elementar. Zum anderen lässt sich durch Aufstellen einer Matrix mit Betriebspunkten durch einmalige quasistationäre Simulation dieser Punkte eine Bewertung für unterschiedliche Kollektive mittels Gewichtung mit deren Zeitanteilen durchführen. Eine transiente Simulation berücksichtigt die Abfolge von Lastzyklen jedoch nur mit erheblichem Mehraufwand, da zeitdiskrete Signale und nicht nur einzelne Betriebspunkte notwendig sind. Somit ist diese Art der Effizienzbewertung sehr wohl für einzelne Maschinen anwendbar, jedoch nicht für eine breite Anwendung über mehrere Maschinen hinweg, da dies sehr lange Simulationszeiten mit sich bringt.

Die Geschwindigkeit als einfach zu messende Größe bietet die Möglichkeit einer breiten Anwendung der Methodik. Obwohl Mährescherfahrantriebe durch den hohen Anteil quasistationärer Betriebspunkte im Einsatzprofil geradezu prädestiniert sind für diese Art von Effizienzbewertung, weisen sie doch Alleinstellungsmerkmale gegenüber anderen mobilen Arbeitsmaschinen auf, die hier noch nicht berücksichtigt sind. Mährescher erfahren im Arbeitszyklus eine Zuladung von über 40 % des Einsatzgewichtes. Außerdem muss Leistung für schwierige Erntebedingungen vorgehalten werden. So werden Fahrantriebe für Mährescher für Worst-Case-Szenarien, wie beispielsweise eine Steigungsfahrt mit vollem Korntank auf nachgiebigem Boden, ausgelegt. Daher zeichnen sich die Lastkollektive von Mährescherfahrantrieben unter Normalbedingungen durch hohe Zeitanteile im Teillastbetrieb aus. Somit muss eine einsatzgerechte Effizienzbewertung nicht nur die Volllast-, sondern vor allem die Teillastwirkungsgrade berücksichtigen. Um neben der geschwindigkeitsabhängigen Bewertung quasistationärer Volllastpunkte, wie sie MUTSCHLER (2008) vorschlägt, die Lastabhängigkeit des Wirkungsgrades mit berücksichtigen zu können, ist eine Erweiterung der Bewertungsmethodik notwendig.

Erweiterung der Bewertungsmethodik

Um die Teillastanteile zu berücksichtigen wird die Methode nach Mutschler um eine weitere, lastabhängige Stufe ergänzt. Für jede Geschwindigkeitsstufe aus dem Kollektiv wird eine typische Lastverteilung simuliert. Diese kann sowohl gemessenen als auch virtuellen Lastkollektiven entnommen werden oder, im einfachsten Fall, nur einzelne Lastpunkte darstellen. Innerhalb einer Geschwindigkeitsstufe werden dann die modellbasiert ermittelten Wirkungsgrade der einzelnen Lastpunkte mit den Zeitanteilen gewichtet und über der Last aufsummiert. Analog zu Mutschler werden dann im zweiten Schritt die kumulierten Wirkungsgrade jeder Geschwindigkeitsstufe mit den Zeitanteilen des Geschwindigkeitskollektives gewichtet und über der Geschwindigkeit aufsummiert. Diese Ergänzung des kumulierten Wirkungsgrades um die Dimension der Last drückt sich gemäß Gleichung 2 aus:

$$\eta_{kum} = \sum_{i=1}^m \left(\sum_{j=1}^n \eta_{Last,j} \cdot \frac{t_{Last,j}}{t_{Last,ges}} \right) \cdot \frac{t_{v,i}}{t_{v,ges}} \quad (Gl. 2)$$

Somit gliedert sich die erweiterte Bewertungsmethodik in folgende Schritte:

1. Simulation quasistationärer Betriebspunkte zur Berechnung der geschwindigkeits- und lastabhängigen Triebstrangwirkungsgrade. Dazu werden für vorgegebene Geschwindigkeiten vorgegebene quasistationäre Teillastpunkte im Modell angefahren und analysiert.

2. Bestimmung und Festlegung des Last- und des Geschwindigkeitskollektivs für die zu analysierende Aufgabe.
3. a) Gewichtung der berechneten Wirkungsgrade mit den Zeitanteilen aus dem Lastkollektiv und Aufsummierung innerhalb einer Geschwindigkeitsstufe
b) Gewichtung der berechneten Summen der einzelnen Geschwindigkeitsstufen mit den Zeitanteilen des Geschwindigkeitskollektivs
4. Kumulierte Darstellung der last- und geschwindigkeitsgewichteten Wirkungsgrade

Durch das Aufsummieren der gewichteten Wirkungsgrade aus der Last bzw. Zugkraft und der Geschwindigkeit werden die effizienzrelevanten Betriebspunkte bei einer Effizienzbewertung besonders stark berücksichtigt, da für die Gewichtung die Zeitanteile aus repräsentativ gemessenen oder virtuell erstellten Geschwindigkeits- und Lastkollektiven herangezogen werden. Vorteil dieser Methode gegenüber der Bewertung anhand von Leistungskollektiven der Radnabe ist, dass sich repräsentative Betriebspunkte, welche sich aus Geschwindigkeit und Zugkraft zusammensetzen, im Modell einstellen lassen. Das im Folgenden kurz beschriebene Simulationsmodell ersetzt die Geschwindigkeitsvorgabe des Fahrers durch einen PI-Regler. Die Zugkräfte werden entweder direkt oder durch ein Zugkraft-Schlupf-Modell aufgeprägt. Ein Leistungspunkt eines Leistungskollektivs stellt theoretisch eine Vielzahl möglicher Betriebspunkte mit unterschiedlichen Systemeinstellungen dar, welche sich aus der Multiplikation verschiedener Zugkräfte und Fahrzeuggeschwindigkeiten ergeben. Diese lassen sich somit mit der vorhandenen Modellstruktur nicht abbilden, da definierte Betriebspunkte notwendig sind. Für jeden Betriebspunkt stellen sich im hydrostatischen Fahrtriebsmodell definierte Schwenkwinkel, Drehzahlen und Drücke ein.

Exemplarische Anwendung der erweiterten modellbasierten Effizienzbewertung

Im Folgenden sollen zwei für Mährescher typische Ansteuerlösungen des hydrostatischen Fahrtriebs gegenübergestellt werden. Der mechanische Teil und hydraulische Kreis des Triebstrangs bleibt in beiden Fällen unverändert. Somit wird, auf einer vergleichbaren Basis, nur der Einfluss der veränderten Ansteuerung bewertet.

Der Aufbau des Modells erfolgt mit der Simulationssoftware AMESim von Siemens. Das Kennlinienmodell des Dieselmotors überträgt die abgerufene Leistung über ein Pumpenverteilergetriebe an die Hydropumpe, welche im geschlossenen Kreislauf mit dem Hydromotor verschaltet ist. Die Modelle der Hydrostaten sind mit validierten Wirkungsgrad-Kennfeldern bestückt. Die Druckverluste in den Leitungen und Schläuchen werden über geeignete Verlustmodelle abgebildet. Der Hydromotor treibt über ein zweistufiges Schaltgetriebe, ein Sperrdifferenzial und Planetenendtriebe die Radnaben an. Über das Fahrwerksmodell können hier Lasten aus der Fahrzeuglängsdynamik, den Fahrwiderständen und dem Zugkraft-Schlupf-Verhalten aufgeprägt werden. Abbildung 3 zeigt schematisch den Aufbau des validierten Modells.

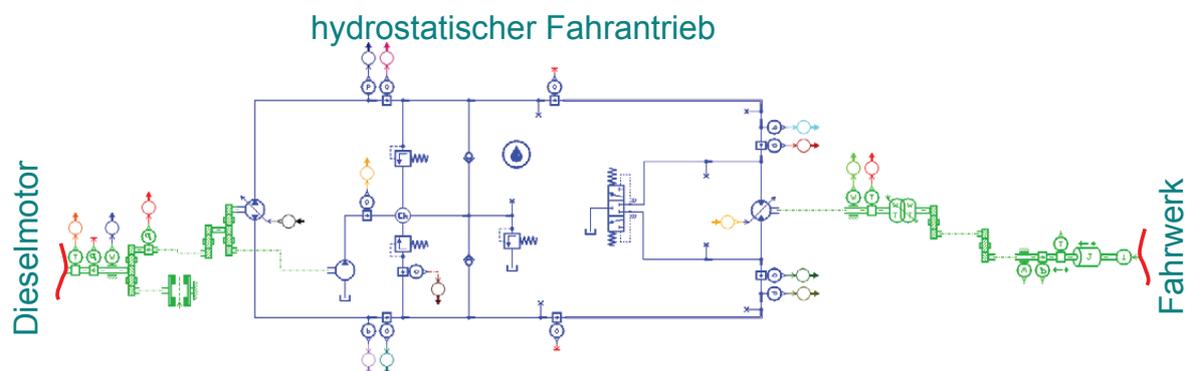


Abbildung 3: Schematisches AMESim-Modell eines Mährescher Fahrtriebs

In der Simulation wird eine reine Folgeverstellung einer Primärverstellung mit druckabhängiger Sekundärverstellung gegenübergestellt. Durch die Sekundärverstellung wird der Hydromotor bei reduziertem Schluckvolumen betrieben, welches sich erst ab dem eingprägten Verstelldruck auf das Maximalvolumen vergrößert.

Das Geschwindigkeitskollektiv einer Arbeitsfahrt für die Gewichtung der Wirkungsgrade ist anhand der Auswertung von Telematik-Daten aus einer Maschinenflotte bei der Weizenernte entstanden (FLECZORECK 2013). Ein Charakteristikum bei der Arbeitsfahrt ist der ausgeprägte Zeitanteil im Hauptarbeitsbereich zwischen 4 und 8 km/h. Als Lastanforderung werden Zugkräfte in der Ebene mit leerem, halbvollem und vollem Korntank auf nachgiebigem Boden angenommen. Diese werden gleich gewichtet. Somit stellt die Summe der nach den Lastanteilen gewichteten Wirkungsgrade in dieser stark vereinfachten Betrachtungsweise den mittleren Wirkungsgrad aus diesen drei Lastpunkten dar.

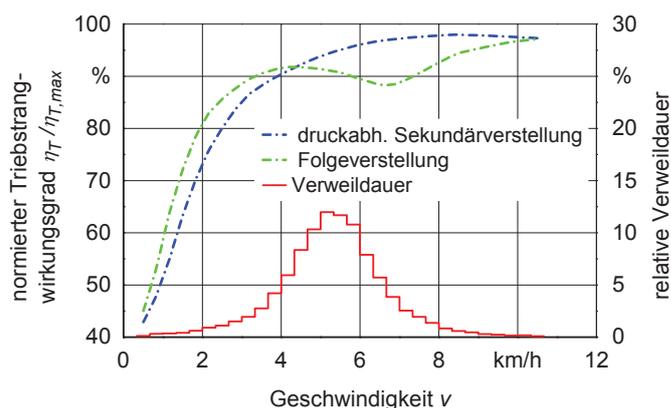


Abbildung 4: Vergleich zweier Ansteuerlösungen für hydrostatische Mährescherfahrtriebe mit einem Geschwindigkeitskollektiv für die Arbeitsfahrt (nach FLECZORECK 2013)

Abbildung 4 zeigt den Vergleich der mit den Zeitanteilen der Lastverteilung gewichteten Wirkungsgrade der reinen Folgeverstellung mit der Primärverstellung samt druckabhängiger Sekundärverstellung. Im niedrigen Geschwindigkeitsbereich zwischen 1 und 4,5 km/h zeigt die reine Folgeverstellung klare Wirkungsgradvorteile, da die Hydropumpe, wegen des größeren Schluckvolumens des Hydromotors, in jedem Geschwindigkeitspunkt auf größeren Schwenkwinkeln läuft. Ab 4,5 km/h,

im stärker gewichteten Hauptarbeitsbereich des Mähdreschers, ist der Wirkungsgrad der Primärverstellung mit druckabhängiger Sekundärverstellung wegen des kleineren Schluckvolumens des Hydromotors und dem damit einhergehenden höheren Mitteldruckniveau deutlich besser. In Abbildung 5 sind die errechneten Wirkungsgrade über der Klassenbreite des Geschwindigkeitskollektivs gemittelt und mit dessen Zeitanteilen gewichtet. Dieser gewichtete Wirkungsgrad ist kumuliert über der Fahrgeschwindigkeit dargestellt.

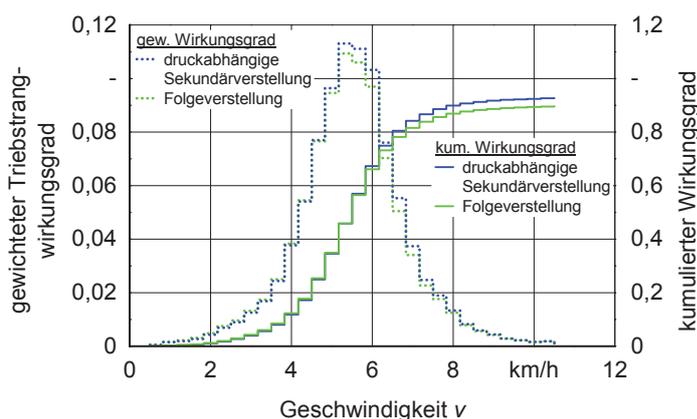


Abbildung 5: Gewichteter und kumulierter Wirkungsgrad für die druckabhängige Sekundärverstellung und die reine Folgeverstellung für die simulierte Arbeitsfahrt des Mähdreschers

Als Ergebnis der modellbasierten Effizienzbewertung kann aus energetischer Sicht für die vorliegende Dimensionierung und die bewertete Teilaufgabe des Mähdruschs eine Empfehlung für die Primärverstellung mit druckabhängiger Sekundärverstellung ausgesprochen werden. Der kumulierte Wirkungsgrad dieser Ansteuerlösung liegt im direkten Vergleich um 4,5 % höher.

Schlussfolgerungen

Die modellbasierte Effizienzbewertung hat sich als leistungsfähiges Tool für den reproduzierbaren Vergleich von Antriebssystemen erwiesen. Effizienzrelevante Vor- und Nachteile einzelner Lösungen lassen sich unter repräsentativen Bedingungen ermitteln. Durch die Erweiterung der Bewertungsmethodik um die Lastanteile lassen sich Mähdrescherfahrantriebe einsatzgerechter auslegen. Virtuelle Fahr- und Feldversuche ermöglichen die Ermittlung von Effizienzpotenzialen bereits im Entwicklungsprozess. Zukünftig werden am Institut für Agrartechnik der Universität Hohenheim mit dieser erweiterten Bewertungsmethodik innovative Antriebskonzepte und Ansteuerlösungen bewertet und optimiert.

Literatur

Anderl, T.; Vogl, K.-H.; Schmid, F.; Kliffken, M. (2013): Hydrostatische Fahrantriebe – Status und Perspektiven. In: 15. Antriebstechnisches Kolloquium, 19.–20.3.2013, Aachen, S. 255–276

Europäische Kommission (2015): Europa-2020-Ziele – Die fünf EU-Kernziele für das Jahr 2020. http://ec.europa.eu/europe2020/europe-2020-in-a-nutshell/targets/index_de.htm, Zugriff am 7.3.2015

Böttinger, S. (2008): Entwicklung der Energieeffizienz bei Landmaschinen. In: Energieeffiziente Landwirtschaft – KTBL-Vortragstagung 8.–9.4.2008 Fulda, KTBL-Schrift 463, Darmstadt, S. 31–41

- Fleczorek, T.; Harms, H.-H.; Lang, T. (2011): Voraussetzungen zur Effizienzbewertung von Antrieben mobiler Maschinen. *Landtechnik* 66(6), S. 426–429, doi: <http://dx.doi.org/10.15150/lt.2011.435>
- Fleczorek, T. (2013): Effizienzbewertung von Antrieben mobiler Arbeitsmaschinen am Beispiel eines Mähdreschers. Forschungsberichte aus dem Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge, Dissertation, Technische Universität Braunschweig, Aachen, Shaker Verlag
- Gallmeier, M. (2009): Vergleichende Untersuchungen an hydraulischen und elektrischen Baugruppenantrieben für landwirtschaftliche Arbeitsmaschinen. Forschungsbericht Agrartechnik 479, Dissertation, Technische Universität München, <http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn:nbn:de:bvb:91-diss-20081219-680447-1-9>
- Götz, M.; Himmelsbach R.; Grad, K. (2013): Elektrifizierung bei Landmaschinen – Konzepte und praktische Erfahrungen. In: Antriebstechnisches Kolloquium, 19.–20.3.2013 Aachen, Apprimus Verlag, S. 277–292
- Häberle, S.; Speer, J. (2014): Einsatzprofile bei Mähdreschern. DLG Test Landwirtschaft, DLG Verlag GmbH, Frankfurt, Ausgabe Mai 2014, S. 8–11
- Karner, J. (2011): Elektrische Antriebe in Landmaschinen. *Landwirt* 2011(24), S. 53–55
- KTBL (2012): Betriebsplanung Landwirtschaft 2012/2013. Darmstadt, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.
- Müller, C.; Häberle, S.; Böttinger, S. (2013a): Lastkollektive von Mähdrescherantrieben für spezifische Teilaufgaben beim Mähdrusch. VDI-MEG Kolloquium Mähdrescher, 12.–13.9.2013, Hohenheim. In: VDI-MEG-Kolloquium Landtechnik, Heft 40, S. 33–40
- Müller, C.; Böttinger, S.; Anderl, T. (2013b): Process-dependent load and power spectra of combine harvester drives. In: Tagung Land.Technik AgEng, 8.–9.11.2013 Hannover, VDI-MEG, VDI-Berichte Nr. 2193, Düsseldorf, VDI Verlag, S. 169–174
- Mutschler, S. (2008): Bewertung und Optimierung von Getriebekonzepten für mobile Arbeitsmaschinen. Forschungsberichte aus dem Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, Aachen, Shaker Verlag
- Sturm, C.; Geimer, M.; Cochoy, O.; Tischler, K.; Heemskerk, E. (2012): Methodik zur Bewertung der Energieeffizienz hydraulischer Antriebssysteme für mobile Arbeitsmaschinen. 5. Fachtagung Baumaschinentechnik 2010, Technische Universität Dresden, 20.–21.9.2012, Dresden, In: Schriftenreihe der Forschungsvereinigung Bau- und Baustoffmaschinen e.V. FVB, Heft Nr. 44, S. 363–380
- Wöbcke, S.; Herlitzius, T. (2014): Mähdrescherschneidwerk mit elektrifizierten Funktionsantrieben - Konzept und erste Feldversuchsergebnisse. Tagung LAND.TECHNIK 2014, VDI-MEG, 19.–20.11.2014, Berlin, In: VDI-Berichte Nr. 2226, Düsseldorf, VDI-Verlag, S. 137–144

Autoren

Dipl.-Ing. Steffen Häberle ist wissenschaftlicher Mitarbeiter und **Prof. Dr.-Ing. Stefan Böttinger** ist Fachgebietsleiter und stellv. Geschäftsführender Direktor des Institutes für Agrartechnik an der Universität Hohenheim, Fachgebiet Grundlagen der Agrartechnik, Garbenstraße 9, 70599 Stuttgart, E-Mail: steffen.haerberle@uni-hohenheim.de

Dr.-Ing. Steffen Mutschler ist Gruppenleiter im Bereich Systemintegration, Bosch Rexroth AG, Glockeraustraße 4, 89275 Elchingen

Hinweis

Das Thema wurde auf der VDI-Tagung LAND.TECHNIK 2014, Berlin, 19.–20. November 2014, vorgestellt und eine Kurzfassung im VDI-Bericht veröffentlicht (Bd. 2226, S. 131–136).