

Kontinuierliche Energieversorgung von elektrischen Landmaschinen über Wide-Span-Systeme

Lennart Buck, Ludger Frerichs

Die Abkehr vom fossilen Dieselkraftstoff, der steigende Bewässerungsbedarf sowie veränderte Regularien zum Einsatz von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln erfordern die Notwendigkeit oder bieten der Landwirtschaft die Chance, etablierte Prozesse systemisch umzustellen. In diesem Artikel wird mit dem Wide-Span-System eine Infrastruktur zur kontinuierlichen Energieversorgung elektrischer Landmaschinen, zur Bewässerung und zur Ausbringung von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln vorgestellt. Über eine Verfahrenssimulation erfolgt die Berechnung des zusätzlichen Energiebedarfes des Systems. Anschließend wird dieser mit dem Energiebedarf weiterer Energieversorgungs- und Antriebskonzepte auf Basis erneuerbarer Energiequellen verglichen. In der Ausrichtung des Systems parallel zur Hauptarbeitsrichtung der Landmaschine beträgt der zusätzliche elektrische Energiebedarf weniger als 0,5 kWh/ha. Eine wirtschaftliche Umsetzung des Wide-Span-Systems als landwirtschaftliches Produktionssystem bleibt zu untersuchen.

Schlüsselwörter

Elektrifizierung, Energieversorgung, Linearberechnung, Verfahrenssimulation, Wide Span

Aufgrund der auch zukünftig zu erwartenden im Vergleich zum Dieselkraftstoff geringen Energiedichte von Batterien (STÖHR et al. 2015), ist zumindest kurz- bis mittelfristig die Substituierung der verbrennungsmotorischen Antriebsstränge durch elektrische Antriebsstränge nicht für alle landwirtschaftlichen Maschinen zu erwarten. Beispielsweise erfordern in manchen Einsätzen die temporäre Autonomie und der prozessbedingte hohe Energieaufwand in Verbindung mit Gewichts- und Dimensionsgrenzen Energieträger hoher Dichte. Um aber auch energieintensivere Verfahren mit elektrischer Energie betreiben zu können, werden daher alternative Energieversorgungskonzepte wie beispielsweise Batteriewechselkonzepte, Verbände aus kleineren Robotereinheiten (BLENDER et al. 2016) oder auch kontinuierliche Energieversorgungskonzepte über Kabel (CULLMANN et al. 2018) diskutiert. Zudem werden Brennstoffzellenlösungen untersucht (BREU und REUTER 2022).

Vor dem Hintergrund des weiter voranschreitenden Klimawandels ist davon auszugehen, dass neben der Notwendigkeit der Dekarbonisierung auch der Bewässerungsbedarf landwirtschaftlicher Flächen weiter zunehmen wird. Die bewässerungsintensivsten Regionen der Welt sind Asien mit 73 % und Amerika mit 16 % der tatsächlich bewässerten landwirtschaftlichen Fläche (SIEBERT et al. 2013). In der weltweiten Betrachtung nehmen halbstationäre Großflächenberegnungssysteme wie Kreisberegnungsmaschinen und Linearberegnungsmaschinen aufgrund der landwirtschaftlichen Flächenstrukturen einen deutlich größeren Stellenwert als in Europa ein. Beispielsweise wurden in den USA

im Jahr 2018 von der insgesamt bewässerten Ackerfläche 57 % über Sprinklersysteme (Kreis-, Linearberegnungsmaschinen u. a.) bewässert (UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE 2019).

Die TU Braunschweig und die HBK Braunschweig untersuchten mit Unterstützung der Landwirtschaftskammer Niedersachsen im Forschungsprojekt „Energy-4-Agri“ mögliche Veränderungen, um die Landwirtschaft für die zukünftigen Anforderungen (Dekarbonisierung, Bewässerung, etc.) vorzubereiten. Unter anderem wurden verschiedene elektrisch angetriebene Maschinenkonzepte wie Flugdrohnen, Roboterverbände, Gantry, Standardtraktoren und Erntemaschinen, aber auch Energieverteilungskonzepte, wie Oberleitungskonzepte, Kabel und Batteriewechselsysteme, konzeptionell und simulativ untersucht (TU BRAUNSCHWEIG 2022a).

Über ein Infrastruktursystem – „Wide-Span-System“ genannt – könnte sowohl elektrische Energie bereitgestellt als auch Flüssigkeit (Wasser, Dünge- und Pflanzenschutzmittel) verteilt werden. In diesem Artikel wird die Idee präsentiert, Linearberegnungsanlagen um eine Oberleitung zu erweitern, sodass einerseits Landmaschinen mit elektrischer Energie versorgt werden können und andererseits über das Rohrleitungssystem die Ausbringung von Dünge-, Pflanzenschutzmittel und Wasser ermöglicht wird. Oberleitungskonzepte für schwere Lkws und Busse existieren (JÖHRENS et al. 2022). FRERICHS et al. haben eine kontinuierlichen Versorgung von Landmaschinen mit elektrischer Energie über ein Oberleitungskonzept auf Basis von Linear- und Kreisberegnungsmaschinen bereits 2014 und 2022 dargestellt (FRERICHS und THIELKE 2014, FRERICHS und BUCK 2022). Weitere Vorteile der Implementierung eines sogenannten Wide-Span-Systems sind die Substitution der Ausbringfahrten mit dem Düngerstreuer und der Pflanzenschutzspritze und somit Einsparung von Energie und Emissionen sowie Verhinderung von Bodenverdichtung.

Das Ziel des vorliegenden Artikels ist es, ein Oberleitungskonzept auf Basis eines Wide-Span-Systems zu konkretisieren und dessen Energiebedarf darzustellen. Anschließend erfolgt eine Gegenüberstellung des Energiebedarfes einer landwirtschaftlichen Verfahrenskette, die kontinuierlich über ein Wide-Span-System mit elektrischer Energie versorgt wird, mit den Energiebedarfen von Verfahrensketten, die über weitere alternative elektrische Antriebskonzepte betrieben werden.

Der vorliegende Artikel ist wie folgt gegliedert: Zunächst werden die Grundlagen von Wide-Span-Systemen zur kontinuierlichen Energieversorgung elektrischer Landmaschinen beschrieben sowie die beiden Ausrichtungsvarianten des Systems quer und parallel zur Hauptarbeitsrichtung erläutert. Anschließend erfolgt die Darstellung der verwendeten Methodik durch Beschreibung der landwirtschaftlichen Verfahrenssimulation, Darlegung der Berechnung des Energiebedarfes von Wide-Span-Systemen sowie Beschreibung der Simulationsparameter. Zuletzt werden die Simulationsergebnisse dargestellt und diskutiert sowie Schlussfolgerungen gezogen.

Wide-Span-System zur kontinuierlichen Energieversorgung elektrischer Landmaschinen

Linearberegnungsmaschinen zählen zu den halbstationären Beregnungsanlagen, da diese an einen festen Aufstellungsort gebunden sind, sich während des Betriebes aber bewegen (DEUTSCHE VEREINIGUNG FÜR WASSERWIRTSCHAFT, ABWASSER UND ABFALL 2019). Genauso wie Gantry, sind Linearberegnungssysteme den Wide-Span-Systemen zuzuordnen. Gantry und Linearberegnungssysteme sind als Geräteträger in Portalbauweise ausgelegt und besitzen eine im Verhältnis zu Traktor-Geräte-Kombinationen große Arbeitsbreite. Im Gegensatz zu Gantry, die als schweres Fahrzeugkonzept für die gesamten landwirtschaftlichen Verfahrensketten, inklusive Ernte und Bodenbearbeitung

ausgelegt sind, sind Linearberechnungssysteme als Rohrleitungssysteme deutlich leichter gebaut und ausschließlich für Düngung, Pflanzenschutz, Bewässerung und (gegebenenfalls) Energieversorgung vorgesehen. Aufgrund der Systemgröße eignen sich Linearberechnungssysteme vorzugsweise für gerade, rechteckige Flächen von über 50 ha in Regionen mit entsprechenden Strukturen wie beispielsweise Nordamerika, Australien und Ungarn (BAYRISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT 2008) und werden mit einer Gesamtlänge von 400 bis über 1.200 m gebaut (SMITH et al. 2014). Lösungen für kleinere, komplexere, in Mitteleuropa übliche Feldkonturen existieren ebenfalls (KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT E.V. 2014).

Wie eingangs erläutert, müssen die heutigen landwirtschaftlichen Verfahren systemisch in vielerlei Hinsicht an sich verändernde Umweltbedingungen angepasst werden. Veränderte Regularien zum Einsatz von Pflanzenschutz- und Düngemitteln, veränderte Anbauverfahren (weniger Grundbodenbearbeitung, weniger Bodenverdichtung) aber auch ein zunehmender Bewässerungsbedarf sind neben der Abkehr von fossilen Kraftstoffen Chancen die genutzt werden müssen, um die Landwirtschaft für zukünftige Herausforderungen zu rüsten. Es erscheint daher sinnvoll, die zukünftigen Systeme so zu entwickeln, dass diese möglichst viele der genannten Herausforderungen adressieren. Wide-Span-Systeme könnten sowohl für die Ausbringung von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln, zur Bewässerung als auch zur Bereitstellung von elektrischer Energie mit einer zusätzlich angebrachten Oberleitung genutzt werden und so Synergieeffekte erzielen.

Experten aus Landwirtschaft, Industrie und Wissenschaft sind nach wie vor uneins, wie zukünftige landwirtschaftliche Maschinenkonzepte aussehen werden. Neben herkömmlichen mobilen Arbeitsmaschinen werden auch kleinere Roboter sowie Flugdrohnen diskutiert, die über Batteriewechselkonzepte, Schnellladestationen oder Photovoltaik mit Energie versorgt werden können. Größere mobile Arbeitsmaschinen können auf dem Feld auch nach Bedarf kontinuierlich über ein Wide-Span-System mit elektrischer Energie versorgt werden. Um die Hof-Feld-Entfernung überbrücken zu können, sind die Landmaschinen mit einer Batterie ausgestattet, die so dimensioniert ist, dass batterieelektrisch auf der Straße eine gewisse Strecke zurückgelegt werden kann. Frerichs hat im Vortrag zu FRERICHS und BUCK (2022) vorgeschlagen, der zunehmenden Vielfalt wegen unter dem Begriff „Prime Mover“ mobile Landmaschinen zu subsumieren, die flexibel Geräte aufnehmen und antreiben können, also Traktoren ebenso wie Systemfahrzeuge, mobile Antriebssysteme, Gantrys, Roboter und auch Flugdrohnen. Das wird hier übernommen.

Ein Wide-Span-System besteht aus selbsttragenden Rohrleitungen die über Fahrwerke abgestützt werden. Die selbsttragenden Rohrleitungen bilden zusammen mit den Fahrwerken ein Segment. Ein Fahrwerk hat standardmäßig zwei Räder. Das erste Fahrwerk am Feldrand wird Hauptantriebswagen genannt und ist größer dimensioniert, um weitere Technik, wie beispielsweise das Antriebssystem oder die Wasserpumpe, aufzunehmen. Bisherige Systeme werden über einen auf dem Hauptantriebswagen verbauten Dieselgenerator betrieben, der den Strom für die Elektromotoren der Fahrwerke erzeugt. Die Steuerung erfolgt über Global Navigation Satellite System, Induktion oder mechanische Tasthebel. Die Segmente fungieren als eigenständige Einheiten und sind über eine flexible Kupplung mit den anschließenden Segmenten verbunden, sodass auch kuptiertes Gelände befahren werden kann (SMITH und NORTH 2009). In den Wide-Span-Systemen müssen die Ausbringeinheiten flexibel in einer Höhe einstellbar sein, sodass die Abdrift und Verdunstung bei der Ausbringung von Wasser, Dünge- und Pflanzenschutzmittel durch einen geringen Zielflächenabstand minimiert wird. Zudem muss eine Mindestdurchfahrtshöhe für entsprechende Landmaschine realisiert werden können. Da

die Infrastruktur zur Versorgung des Wide-Span-Systems mit Wasser und Strom, wie beispielsweise wasserführende Gräben oder Rohrleitungen sowie stromführende Kabel, erforderlich ist, kann die eigentliche Feldfläche nicht vollständig genutzt werden; hier wird von durchschnittlich 95 % ausgegangen. Grundsätzlich werden Linearberegnungsanlagen bisher ausschließlich auf Flächen verwendet, die Steigungen von bis zu 6 % aufweisen (SMITH et al. 2014).

Zur Berechnung des Energiebedarfes ist die Ausrichtung des Wide-Span-Systems relevant. Solche Infrastruktursysteme können parallel oder quer zur Hauptarbeitsrichtung auf dem Feld installiert werden. In den folgenden Unterkapiteln erfolgt die Beschreibung der beiden Ausrichtungen.

Ausrichtung quer zur Hauptarbeitsrichtung

In Abbildung 1 ist die Ausrichtung des Wide-Span-Systems quer zur Hauptarbeitsrichtung der Landmaschine dargestellt. In dieser Ausrichtung besitzt das System dieselbe Breite wie das Feld und wird im Anbauverfahren des Controlled Traffic Farmings eingesetzt, da immer dieselben Fahrspuren genutzt und auch verdichtet werden. Für das Hauptfeld wird daher für das Fahren über eine festgefahrene Fahrspur der Rollwiderstandsbeiwert mit $f_R = 0,05$ angenommen (REICH 2018). Um die Landmaschine kontinuierlich mit elektrischer Energie versorgen zu können, muss das Wide-Span-System mit der Arbeitsgeschwindigkeit der Landmaschine mitfahren. Würden die Ausbringtechnik und Leistung nicht an das System angepasst, dann müssten die Fahrwerke so ausgelegt sein, dass das landwirtschaftliche Verfahren mit der höchsten Fahrgeschwindigkeit (bspw. Düngerstreuen bei 4,4 m/s) realisiert werden kann (AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS 1999).

Die Fahrspuren des Vorgewendes sind um 90° zu denen des Hauptfeldes gedreht. Insofern fahren die Landmaschinen im Vorgewende hier im Beispiel parallel zum Wide-Span-System, das nun nicht mehr kontinuierlich mit der Landmaschine mitfahren muss. Eine alternative Strategie zur Bearbeitung des Vorgewendes wäre, wenn die Landmaschine im Vorgewende batterieelektrisch fahren würde. Die Batterie müsste entsprechend dimensioniert werden.

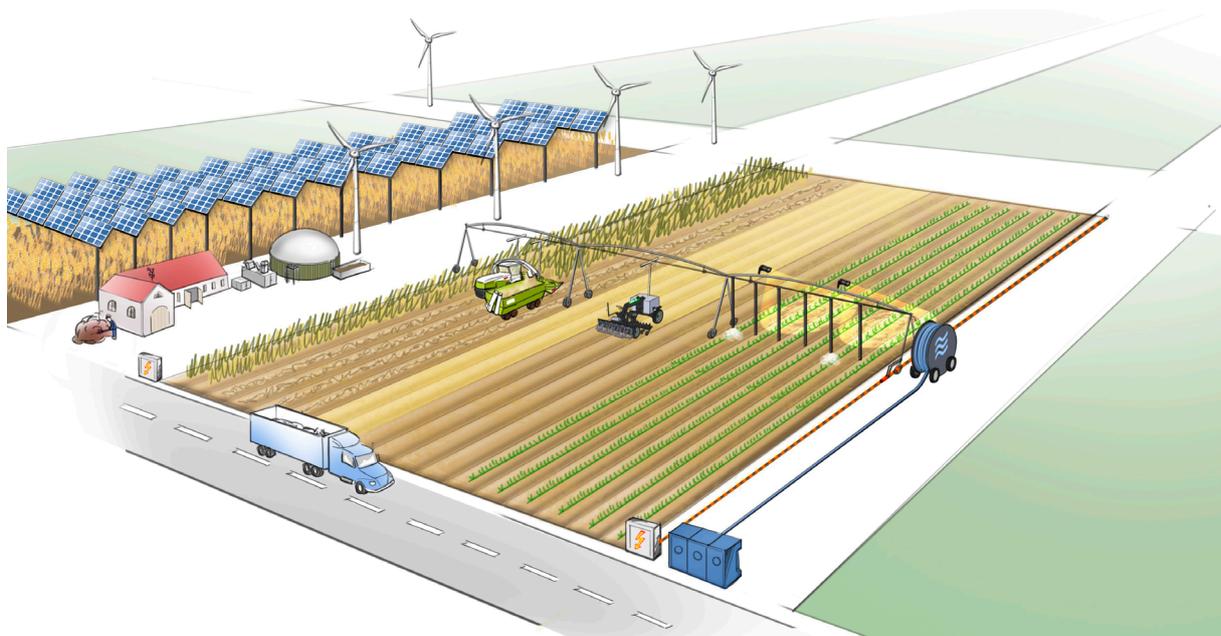


Abbildung 1: Kontinuierliche Energieversorgung über ein Wide-Span-System quer zur Hauptarbeitsrichtung

Ausrichtung parallel zur Hauptarbeitsrichtung

In der zweiten Strategie ist das Wide-Span-System parallel zur Hauptarbeitsrichtung der Landmaschine ausgerichtet und besitzt dieselbe Länge wie das Feld (Abbildung 2). Aufgrund der zur Abstützung notwendigen Fahrwerke kann die Landmaschine während der Bearbeitung des Hauptfeldes nicht direkt unter dem Gestänge fahren, sondern benötigt eine seitlich ausgelegte Oberleitung und gegebenenfalls einen ausschwenkbaren Pantografen. Die Räder des Gestängesystems erzeugen im Hauptfeld quer zur Hauptarbeitsrichtung neue Fahrspuren im unbearbeiteten Bereich des Feldes, sodass für die Berechnung ein Rollwiderstandsbeiwert für gegrubberten Acker von $f_R = 0,12$ zugrunde gelegt wird. Vor den Rädern können Spurschilde o.Ä. angebracht werden, um größere Bodenunebenheiten zu beseitigen.

Wenn die Landmaschine das Vorgewende erreicht und wendet, wird kurzzeitig von der kontinuierlichen Stromversorgung auf die batterieelektrische Stromversorgung gewechselt. Das Wide-Span-System verfährt während der Wendezeit der Landmaschine mit langsamer Fahrgeschwindigkeit (circa 0,5 m/s) um eine Arbeitsbreite. In der nächsten Spur ist so wieder eine kontinuierliche Energieversorgung vorhanden. Das Wide-Span-System benötigt in dieser Ausrichtung parallel zur Hauptarbeitsrichtung ausschließlich während der Wendezeit der Landmaschine Energie für das Versetzen.

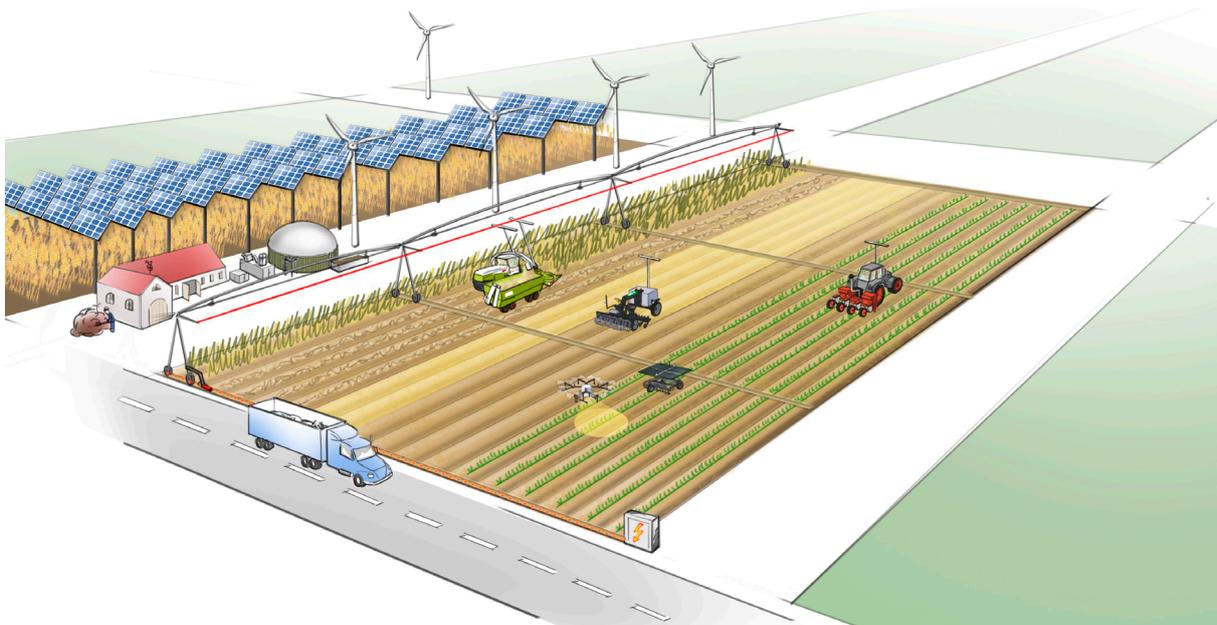


Abbildung 2: Kontinuierliche Energieversorgung über ein Wide-Span-System parallel zur Hauptarbeitsrichtung

Auch in der Ausrichtung des Wide-Span-Systems parallel zur Hauptarbeitsrichtung ist zur Bearbeitung des Vorgewendes eine angepasste Fahrstrategie erforderlich. Im Simulationsbeispiel wird so verfahren, dass ein Segment des Gestängesystems im Vorgewende abgekoppelt werden kann, das dann mit der Fahrgeschwindigkeit der Landmaschine mitfährt und diese so weiterhin kontinuierlich mit Strom versorgt. Durch das Abkoppeln eines Segmentes wird vermieden, dass das gesamte Wide-Span-System mit der Fahrgeschwindigkeit der Landmaschine mitfahren muss. Die Stromversorgung erfolgt an beiden Vorgewenden über elektrische Kontakte.

Methodik

Die Berechnung des zusätzlichen Energiebedarfes von Wide-Span-Systemen zur kontinuierlichen Energieversorgung von Landmaschinen wird über eine Verfahrenssimulation durchgeführt. Der Energiebedarf von Wide-Span-Systemen wird über die Fahrwiderstandsgleichung unter Berücksichtigung der Eingangsparameter des Modellfeldes berechnet. In den folgenden Unterkapiteln erfolgt die Erläuterung der zugrunde liegenden Methodik.

Landwirtschaftliche Verfahrenssimulation

Am Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge (IMN) entwickelten HANKE et al. (2018) und TRÖSKEN et al. (2020) im Forschungsprojekt „Effiziente Kraftstoffnutzung in der Agrartechnik“ (EKO-Tech) mit den Partnern ein agentenbasiertes Verfahrenssimulationsmodell zur ganzheitlichen Simulation landwirtschaftlicher Verfahrensketten. Abbildung 3 zeigt die Zusammenhänge dieser Verfahrenssimulation. Über ein selbst programmiertes Graphical User Interface werden die Parameter von landwirtschaftlichen Modellbetrieben wie Maschinenflotten, Felder, Betriebsstätten und Verfahrensketten innerhalb von Fruchtfolgen in die Verfahrenssimulation eingepflegt. Die Simulation erfolgt durch die beiden unabhängigen Bausteine „Maschinenmodell“ und „Verfahrenmodell“.

Über das Maschinenmodell kann der erforderliche Energiebedarf von landwirtschaftlichen Verfahrensschritten berechnet werden. Für die herkömmlichen Landmaschinen auf Basis von fossilem Dieselmotorkraftstoff erfolgt die Berechnung für unterschiedliche Kombinationen von Motoren, Getrieben, Fahrwerken und Arbeitsgeräten. In das Verfahrenmodell fließen die Parameter von Betriebsstätten, Feldern, Straßen und weiterer technischer Maschinendaten ein, wie Leistung, Masse, Tank- und

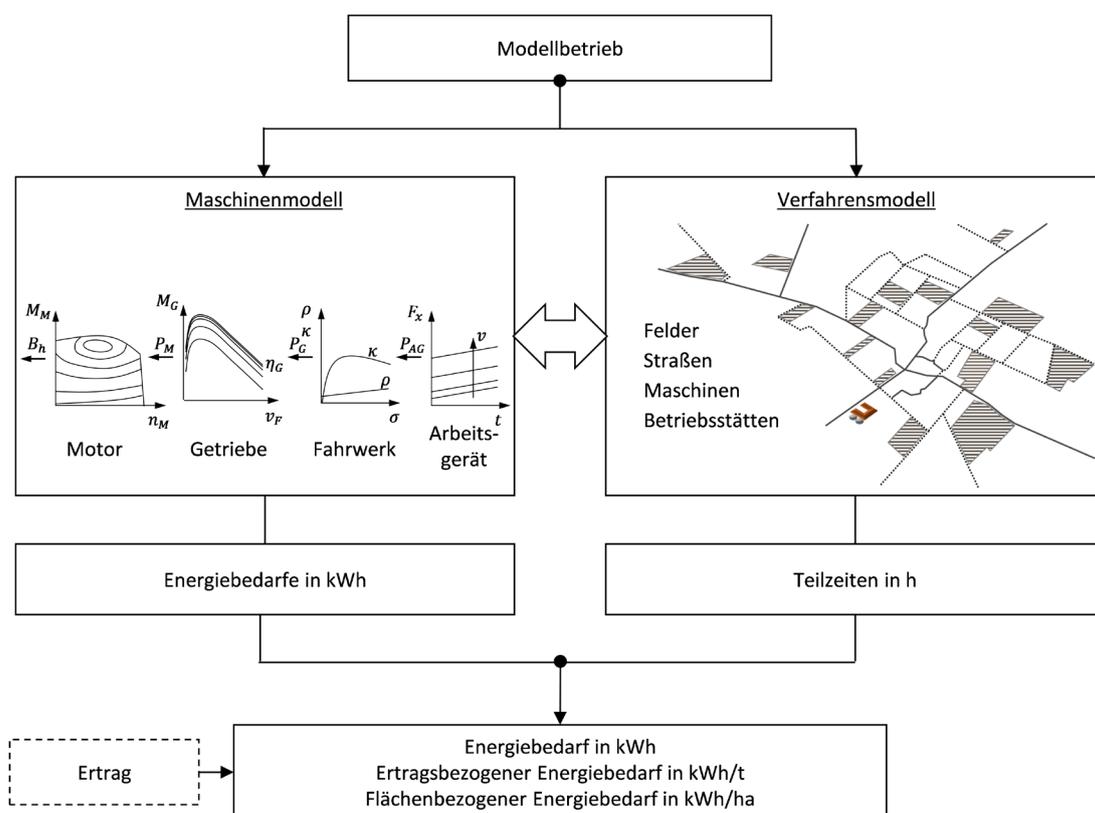


Abbildung 3: Landwirtschaftliche Verfahrenssimulation der TU Braunschweig in Anlehnung an TröskEN et al. (2020)

Behältervolumen, Arbeitsbreite, Überladeleistung sowie Fahrgeschwindigkeit. Ergebnis des Verfahrensmodells sind Teilzeiten nach dem Zeitgliederungsschema des Kuratoriums für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL) wie beispielsweise Arbeitsverrichtungs-, Wende- und Wegezeit.

Je nach Betriebsstruktur, Verfahrensschritt und Maschinenkonzept ergeben sich über den Leistungsbedarf während dieser Teilzeiten unterschiedliche Leistungszeitreihen für die Feldebewirtschaftung. Zusätzlich fließen in die Simulation weitere Parameter wie der Ertrag ein, sodass letztendlich für die einzelnen Teilzeiten der gesamte Energiebedarf, der Energiebedarf pro Fläche und der Energiebedarf pro produzierter Tonne Erntegut errechnet werden. Die Kalkulation der Kosten landwirtschaftlicher Verfahrensketten ist über die Simulation ebenfalls möglich.

Eine Weiterentwicklung des Simulationsmodells ermöglicht die Energiebedarfe zukünftiger Landmaschinenkonzepte wie beispielsweise von Flugdrohnen, Roboterverbänden, Gantry's sowie aktueller Traktoren und Erntemaschinen auf Basis regenerativ gewonnener elektrischer Energie zu simulieren (TU BRAUNSCHWEIG 2022a). Das Maschinenmodell wird um mathematische Berechnungen der Energiebedarfe für die alternativen Maschinenkonzepte ergänzt. Über den Heizwert von Diesel (9,8 kWh/l) und die statischen Wirkungsgrade von Dieselmotor ($\eta = 0,32$) und Elektromotor ($\eta = 0,85$) erfolgt die Umrechnung in elektrischen Energiebedarf. Auch Energieversorgungskonzepte, wie das in diesem Beitrag beschriebene Wide-Span-System, werden simuliert.

Berechnung des Energiebedarfs von Wide-Span-Systemen

Die Berechnung des Energiebedarfs beider Ausrichtungsvarianten des Wide-Span-Systems erfolgt in Anlehnung an die Fahrwiderstandsgleichung aus der Fahrzeugdynamik. Der Gesamtfahrwiderstand F_T setzt sich aus dem Rollwiderstand F_R , dem Luftwiderstand F_A , dem Steigungswiderstand F_G , dem Beschleunigungswiderstand F_I sowie eventuell zusätzlichem Zugkraftbedarf $F_{Zugkraft}$ zusammen (REICH 2018). Da das Wide-Span-System sich bei relativ geringen Geschwindigkeiten (< 5 m/s) bewegt und kein zusätzlicher Zugkraftbedarf besteht – die Landmaschinen sind mit eigenen Antrieben ausgestattet –, werden F_A , F_I und $F_{Zugkraft}$ vernachlässigt. F_G kann ebenso vernachlässigt werden, da zu Vergleichszwecken mit der dieselbetriebenen Verfahrenskette der Bewegungszustand in der Ebene betrachtet wird. Der Fahrwiderstand ergibt sich so ausschließlich aus dem Rollwiderstand F_R . Die weiteren Gleichungen zur Berechnung des Energiebedarfes werden im Folgenden hergeleitet.

Die Anzahl der Segmente $n_{Segment}$ kann in der Ausrichtung quer zur Hauptarbeitsrichtung aus der Feldbreite W_{Feld} und in der Ausrichtung parallel zur Hauptarbeitsrichtung aus der Feldlänge L_{Feld} sowie dem Abstand der Fahrwerke zueinander berechnet werden. In Europa ist aufgrund der Kompatibilität mit den üblichen Anbaugerätearbeitsbreiten der Anbaugeräte ein Abstand der Fahrwerke von 36 m, 42 m, 48 m, 54 m oder 60 m üblich (SMITH und NORTH 2009). Die Berechnung im vorliegenden Artikel erfolgt mit einem Abstand der Fahrwerke von 54 m. Ein Segment wird an beiden Seiten jeweils durch ein Fahrwerk abgestützt.

Die Gesamtanzahl an Wendevorgängen $n_{Wendungen,gesamt}$ eines Feldes kann aus der Anzahl an Fahrspuren des Hauptfeldes (HF) $n_{Fahrspuren,HF}$ und der Anzahl an Fahrspuren des Vorgewendes (VG) $n_{Fahrspuren,VG}$ berechnet werden. In der Logik der Verfahrenssimulation werden auch die erste Feldfahrt der Landmaschine nach dem Vorrüsten auf der Feldeinfahrt zur ersten Fahrspur sowie die letzte Feldfahrt nach Beendigung der letzten Fahrspur zur Feldeinfahrt, um dort nachzurüsten, als Wendezeit bezeichnet. Aus diesem Grund wird zur Berechnung der Gesamtanzahl an Wendevorgängen $n_{Wendungen,gesamt}$ eines Feldes eine Eins addiert.

Der Rollwiderstand F_R eines einzelnen mittleren Fahrwerkes setzt sich aus dem Rollwiderstandsbeiwert f_R des entsprechenden Bodenzustands, der Gesamtmasse m_{gesamt} sowie der Erdbeschleunigungskraft g mit $9,81 \text{ m/s}^2$ zusammen (Gleichung 1):

$$m_{gesamt} = m_{Rohrleitung} + m_{Fahrwerk} + m_{Oberleitung} + m_{Flüssigkeit} \quad (\text{Gl. 1})$$

Die beiden äußeren Fahrwerke stützen jeweils nur die Hälfte des Gewichtes einer selbsttragenden Rohrleitung ab, daher wird zur Berechnung des Fahrwiderstandes des gesamten Wide-Span-Systems F_T insgesamt ein belastetes Fahrwerk subtrahiert und dafür ein unbelastetes Fahrwerk hinzuaddiert. Bei einem Abstand der Fahrwerke von 54 m zueinander, ergibt sich aus der Masse einer einzelnen Rohrleitung $m_{Rohrleitung}$ und der Masse der Fahrwerke $m_{Fahrwerk}$ eine auf einem Fahrwerk lastende Masse von 1.730 kg (PIERCE CORPORATION 2004). Zusätzlich ist die Masse der Oberleitung $m_{Oberleitung}$ zu berücksichtigen, die mit 500 kg pro Segment angenommen wird. Die Masse der Oberleitung $m_{Oberleitung}$ setzt sich aus der Masse der beiden Fahrdrähte (Plus- und Minuspol) sowie der Masse von zusätzlich notwendigen Tragstrukturen für die Fahrdrähte zusammen. Die Masse eines Fahrdrahtes kann mit circa einem kg/m angenommen werden (RAIL POWER SYSTEMS 2022). Aus der über die Bearbeitung des gesamten Feldes addierten Wendezeit kann über die Anzahl an Fahrspuren des gesamten Feldes $n_{Fahrspuren,gesamt}$ die Wendezeit pro Fahrspur $t_{Wendung}$ errechnet werden.

Ab diesem Punkt ist es erforderlich, die Berechnung des Energiebedarfes für die beiden Ausrichtungen des Wide-Span-Systems, quer und parallel zur Hauptarbeitsrichtung, gesondert vorzunehmen.

Berechnung des Energiebedarfes von Wide-Span-Systemen quer zur Hauptarbeitsrichtung

Der Leistungsbedarf für das kontinuierliche Mitbewegen des Wide-Span-Systems im Hauptfeld $P_{quer,HF}$ wird aus dem Fahrwiderstand des gesamten Systems F_T , der Feldarbeitsgeschwindigkeit $v_{Arbeitsverrichtung}$ sowie dem Gesamtwirkungsgrad des Wide-Span-Systems (WSS) η_{WSS} berechnet (Gleichung 2). Für den Gesamtwirkungsgrad η_{WSS} wird der Wirkungsgrad vom Stromanschluss des Gestängesystems über einen Elektromotor und den Antriebsstrang bis zum Rad mit 0,77 angenommen (ACATECH 2018).

$$P_{quer,HF} = \frac{F_T \times v_{Arbeitsverrichtung}}{\eta_{WSS}} \quad (\text{Gl. 2})$$

Anschließend kann der Energiebedarf für die Bearbeitung des Hauptfeldes $E_{quer,HF}$ aus dem Leistungsbedarf $P_{quer,HF}$, der Länge einer einzelnen Fahrspur im Hauptfeld $L_{Fahrspur}$ der Anzahl an Fahrspuren im Hauptfeld und der Feldarbeitsgeschwindigkeit $v_{Arbeitsverrichtung}$ berechnet werden (Gleichung 3).

$$E_{quer,HF} = P_{quer,HF} \times \frac{L_{Fahrspur} \times n_{Fahrspuren,HF}}{v_{Arbeitsverrichtung}} \quad (Gl. 3)$$

Die Länge der Fahrspur im Hauptfeld $L_{Fahrspur}$ ergibt sich aus der Länge des Feldes L_{Feld} , der Arbeitsbreite der Landmaschine $W_{Arbeitsverrichtung}$ sowie der Anzahl an Fahrspuren im Vorgewende $n_{Fahrspur,VG}$. Zur Bearbeitung des Vorgewendes wird das Wide-Span-System gemäß der Ausrichtung parallel zur Arbeitsrichtung verwendet. Das Gestängesystem fährt nicht mehr kontinuierlich mit der Landmaschine mit, sondern ist parallel zur jeweiligen Fahrspur im Vorgewende ausgerichtet und versetzt sich während der Wendezeit jeweils um eine Fahrspur. Die benötigte Leistung zum Versetzen des Wide-Span-Systems im Vorgewende $P_{quer,VG}$ setzt sich aus dem Fahrwiderstand des gesamten Gestängesystems F_T , der Versetzungsgeschwindigkeit $v_{Versetzung}$ und dem Gesamtwirkungsgrad des Wide-Span-Systems η_{WSS} zusammen (Gleichung 4). Die Versetzungsgeschwindigkeit $v_{Versetzung}$ des Gestängesystems kann dafür über die Arbeitsbreite $W_{Arbeitsverrichtung}$ sowie die Wendezeit $t_{Wendung}$ berechnet werden:

$$P_{quer,VG} = \frac{F_T \times v_{Versetzung}}{\eta_{WSS}} \quad (Gl. 4)$$

Der Energiebedarf $E_{quer,VG}$ ergibt sich anschließend über Gleichung 5:

$$E_{quer,VG} = P_{quer,VG} \times t_{Wendungen,VG} \quad (Gl. 5)$$

Aus den Energiebedarfen für das Hauptfeld $E_{quer,HF}$ und das Vorgewende $E_{quer,VG}$ ergibt sich für das Wide-Span-System der Gesamtenergiebedarf für das Feld E_{Feld} und der Energiebedarf pro ha $E_{pro\ ha}$.

Berechnung des Energiebedarfes von Wide-Span-Systemen parallel zur Hauptarbeitsrichtung

In der Ausrichtung des Wide-Span-Systems parallel zur Hauptarbeitsrichtung ergibt sich für das Hauptfeld der benötigte Leistungsbedarf für das Versetzen $P_{parallel,HF}$ aus dem Fahrwiderstand des gesamten Systems F_T , der Versetzungsgeschwindigkeit $v_{Versetzung}$ sowie dem Gesamtwirkungsgrad. Aus dem Leistungsbedarf für das Versetzen des Wide-Span-Systems im Hauptfeld $P_{parallel,HF}$ und der Wendezeit im Hauptfeld $t_{Wendungen,HF}$ kann der Gesamtenergiebedarf für das Versetzen im Hauptfeld $E_{parallel,HF}$ wie folgt berechnet werden:

$$E_{parallel,HF} = P_{parallel,HF} \times t_{Wendungen,HF} \quad (Gl. 6)$$

Im Vorgewende wird ein Segment des Wide-Span-Systems abgekuppelt, welches dann mit der Arbeitsgeschwindigkeit der Landmaschine mitfährt und so auch im Vorgewende eine kontinuier-

liche Stromversorgung gewährleistet. Der Leistungsbedarf des Wide-Span-Systems im Vorgewende $P_{parallel, VG}$ errechnet sich aus dem Gesamtfahrwiderstand eines Segmentes F_T , mittleres Segment der Feldarbeitsgeschwindigkeit der Landmaschine $v_{Arbeitsverrichtung}$ sowie dem Wirkungsgrad des Wide-Span-Systems η_{WSS} . Der Energiebedarf für die Bearbeitung beider Vorgewende $E_{parallel, VG}$ setzt sich aus der benötigten Leistung des Wide-Span-Systems im Vorgewende $P_{parallel, VG}$, der Breite des Feldes W_{Feld} , der Anzahl an Fahrspuren im Vorgewende $n_{Fahrspuren, VG}$, sowie der Feldarbeitsgeschwindigkeit der Landmaschine $v_{Arbeitsverrichtung}$ zusammen (Gleichung 7).

$$E_{parallel, VG} = P_{parallel, VG} \times \frac{W_{Feld} \times n_{Fahrspuren, VG}}{v_{Arbeitsverrichtung}} \quad \text{Gl. 7}$$

Zuletzt kann der Gesamtenergiebedarf des Wide-Span-Systems für das Feld E_{Feld} sowie der Energiebedarf pro ha $E_{pro\ ha}$ berechnet werden.

Simulationsparameter

Die Simulation der Verfahrenskette erfolgt am Beispiel eines rechteckigen Feldes mit einer Größe von 30 ha und leichtem Boden. Das Feld hat eine Breite von 320 m und eine Länge von 930 m. Auf dem Feld wird Gerste mit einem Ertrag von 7,4 t/ha angebaut. In Tabelle 1 ist die für diesen Artikel simulierte landwirtschaftliche Verfahrenskette für den Anbau von Gerste dargestellt.

Tabelle 1: Verfahrenskette für den Anbau von Gerste auf dem Bespielfeld (30 ha)

Verfahren	Maschinenkombination (Leistung; Arbeitsbreite)
Kalkung	157 kW; Schleuderstreuer 36 m
Stoppelsturz	176 kW; Kurzscheibenegge 4,5 m
Bodenbearbeitung (2 x)	338 kW; Grubber 8 m
Aussaat	200 kW; Mulchsämaschine 6 m
Chemischer Pflanzenschutz (3 x)	157 kW; Pflanzenschutzspritze 36 m
Mineralische Düngung (3 x)	157 kW; Schleuderstreuer 36 m
Getreideernte und Transport	400 kW; Mähdrescher 10,5 m und zwei Abfahrspanne

Simulationsergebnisse und Diskussion

Das Wide-Span-System soll vier Einsatzzwecke erfüllen. Einerseits Übertragung von elektrischer Energie und andererseits Ausbringung von Dünge-, Pflanzenschutzmittel und Wasser, sodass die diversen Fahrten mit dem Düngerstreuer und der Pflanzenschutzspritze eingespart werden können. Für den Fahrtrieb des Wide-Span-Systems wurde der zusätzliche Energiebedarf pro Hektar in den Ausrichtungsvarianten parallel und quer zur Hauptarbeitsrichtung berechnet (Abbildung 4).

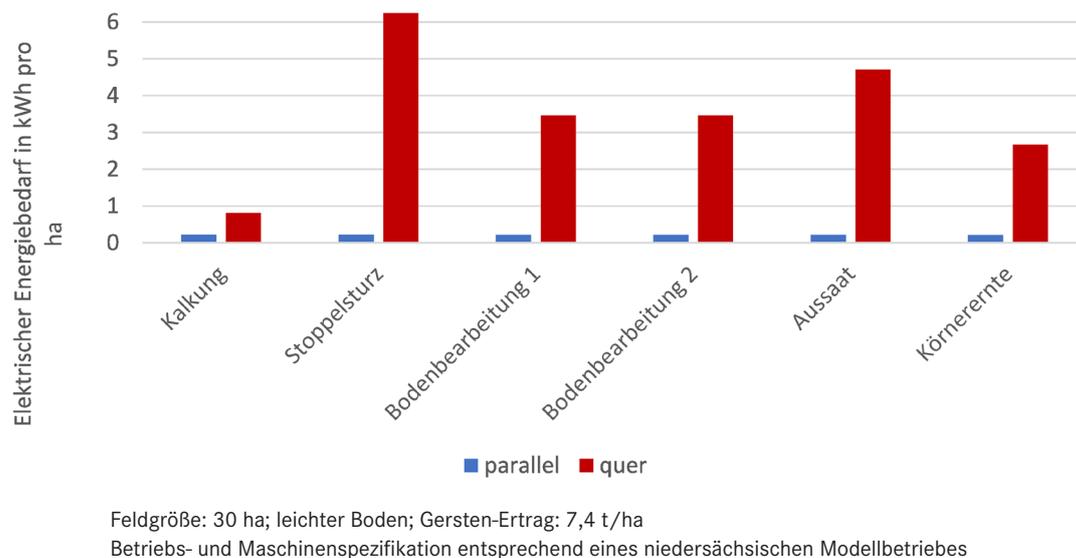
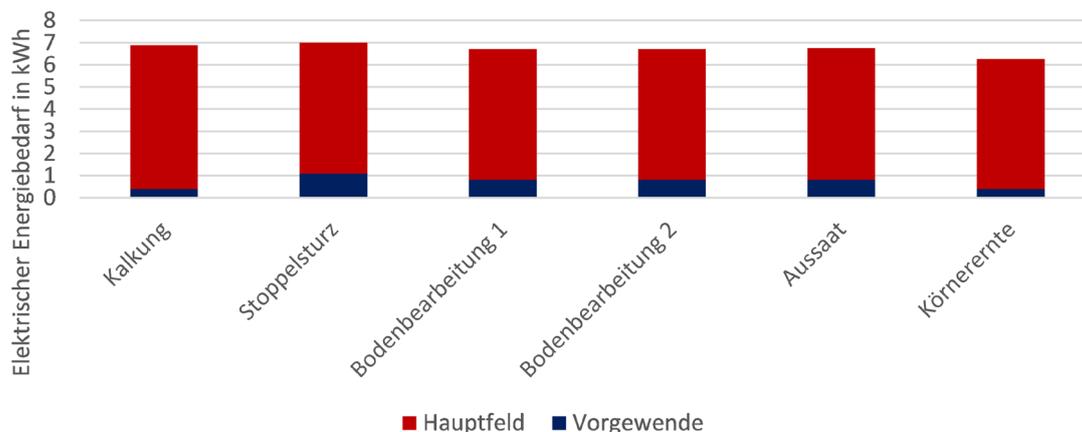


Abbildung 4: Vergleich des zusätzlichen elektrischen Energiebedarfs pro Hektar nur für den Fahrtrieb des Wide-Span-Systems parallel und quer zur Hauptarbeitsrichtung

Der Energiebedarf für den Fahrtrieb des Wide-Span-Systems ist in der Ausrichtung quer zur Hauptarbeitsrichtung bei allen Verfahrensschritten deutlich größer als in der Ausrichtung parallel zur Hauptarbeitsrichtung. Das liegt daran, dass das Wide-Span-System in der Ausrichtung quer zur Hauptarbeitsrichtung kontinuierlich mit der Arbeitsgeschwindigkeit der bearbeitenden Maschinenkombination mitfährt. Bei der unveränderten Übernahme von landwirtschaftlichen Verfahrensschritten mit geringer Arbeitsbreite, wie beispielsweise dem Stoppelsturz mit 4,5 m, ist die Anzahl an Fahrspuren im Vergleich zur Kalkung mit einer Arbeitsbreite von 36 m deutlich größer, sodass das Wide-Span-System deutlich längere Strecken zurücklegen muss. Da der Energiebedarf pro Hektar für alle Verfahren in der Ausrichtungsvariante parallel zur Hauptarbeitsrichtung deutlich geringer ist als in der Ausrichtungsvariante quer zur Hauptarbeitsrichtung, wird in der weiteren Darstellung der Ergebnisse ausschließlich die Ausrichtungsvariante parallel zur Hauptarbeitsrichtung betrachtet.

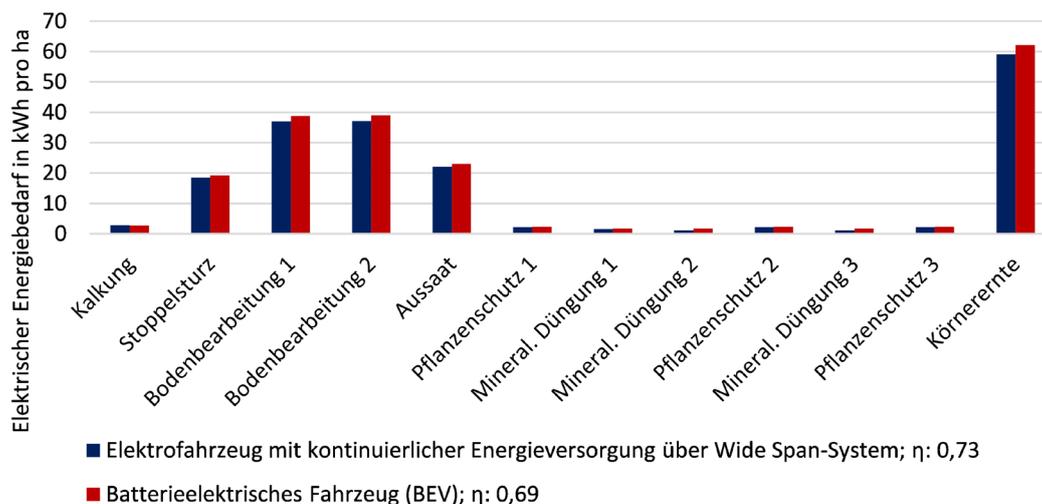
Der elektrische Energiebedarf auf dem 30 ha Beispielfeld variiert von 6,3 kWh bei der Körnerernte bis zu 7,0 kWh beim Stoppelsturz (Abbildung 5). An der Körnerernte sind ein Mähdrescher sowie zwei Abfahrspanne beteiligt. Die drei Fahrzeuge können über dasselbe Wide-Span-System mit Energie versorgt werden. Der geringere Energiebedarf für den Fahrtrieb des Gestängesystems bei der Körnerernte im Vergleich zum Stoppelsturz kann wie folgt erklärt werden: Der größte Teil des Energiebedarfes resultiert aus der Bearbeitung des Hauptfeldes. Für die Fahrt während der Bearbeitung des Hauptfeldes entsteht sowohl für die Körnerernte als auch den Stoppelsturz ein Energiebedarf von 5,9 kWh. Der höhere Gesamtenergiebedarf des Stoppelsturzes ist durch dessen höheren Energiebedarf für die Bearbeitung des Vorgewendes bedingt. Das liegt daran, dass das Wide-Span-System hier kontinuierlich mit der Feldarbeitsgeschwindigkeit der bearbeitenden Maschinenkombination mitfahren muss. Da dies aufgrund der verhältnismäßig kleinen Arbeitsbreite von 4,5 m beim Stoppelsturz deutlich häufiger als bei der Ernte mit einer Arbeitsbreite von 10,5 m geschieht, ist der Energiebedarf des Stoppelsturzes für das Vorgewende höher.



Feldgröße: 30 ha; leichter Boden; Gersten-Ertrag: 7,4 t/ha
 Betriebs- und Maschinenspezifikation entsprechend eines niedersächsischen Modellbetriebes

Abbildung 5: Elektrischer Energiebedarf des Fahrtriefes eines Wide-Span-Systems in der Ausrichtung parallel zur Hauptarbeitsrichtung auf einem Beispielfeld

In Abbildung 6 wird der gesamte Energiebedarf der kontinuierlich über ein Wide-Span-System mit elektrischer Energie versorgten Verfahrenskette dem Energiebedarf einer batterieelektrisch (battery electric vehicle = BEV) betriebenen Verfahrenskette gegenübergestellt.



Elektrofahrzeug mit kontinuierlicher Energieversorgung über Wide Span-System; η : 0,73
 Batterieelektrisches Fahrzeug (BEV); η : 0,69
 Feldgröße: 30 ha; leichter Boden; Gersten-Ertrag: 7,4 t/ha
 Betriebs- und Maschinenspezifikation entsprechend eines niedersächsischen Modellbetriebes

Abbildung 6: Vergleich unterschiedlicher elektrischer Energieversorgungssysteme am Beispiel einer landwirtschaftlichen Verfahrenskette für den Anbau von Gerste auf einem Beispielfeld

Der Energiebedarf der kontinuierlich über ein Wide-Span-System mit elektrischer Energie versorgten Verfahrenskette liegt bei allen Verfahrensschritten leicht unter dem Energiebedarf der batterieelektrischen Verfahrenskette. Für die erste Bodenbearbeitung beträgt der Energiebedarf batterieelektrisch 39 kWh und über ein Wide-Span-System (kontinuierlich mit elektrischer Energie versorgt) 37 kWh. Bei den Verfahren des Pflanzenschutzes und der mineralischen Düngung ist der Energiebedarf beider Energieversorgungskonzepte nahezu identisch. Der Energiebedarf der ersten mineralischen Düngung beträgt batterieelektrisch 1,7 kWh und kontinuierlich über ein Wide-Span-System mit elektrischer

Energie versorgt 1,5 kWh. Für diese Verfahrensschritte ist das Rohrleitungssystem mit Dünge- bzw. Pflanzenschutzmittel gefüllt, sodass die Masse der Flüssigkeit $m_{\text{Flüssigkeit}}$ berücksichtigt werden muss. Dagegen fällt im Vergleich zu einer Ausbringung mit Düngerstreuer oder Pflanzenschutzspritze der Energiebedarf für die Fahrten weg. Im Vergleich sind die Energiebedarfe für diese Verfahrensschritte und die Unterschiede zwischen den Versorgungssystemen jeweils gering.

In diesem Artikel werden typische Wirkungsgrade der jeweiligen Umwandlungsketten ab der Energie erzeugenden Anlage (Wind- und Sonnenenergie) laut einer Studie der ACATECH (2018) verwendet. Der Gesamtwirkungsgrad der batterieelektrisch betriebenen Verfahrenskette $\eta_{BEV} = 0,69$ setzt sich aus den Einzelwirkungsgraden der Stromübertragung von der Energie erzeugenden Anlage zur Batterieladestation ($\eta = 0,95$), der Batterienutzung (Laden und Entladen $\eta = 0,9$), des Elektromotors ($\eta = 0,85$) und der Mechanik ($\eta = 0,95$) zusammen. Dagegen müssen im Gesamtwirkungsgrad der kontinuierlich über ein Wide-Span-System mit elektrischer Energie versorgten Verfahrenskette von $\eta_{LM} = 0,73$ die Wirkungsgrade der Stromübertragung von der Energie erzeugenden Anlage zum Feldrand ($\eta = 0,95$), die Stromübertragung über das Wide-Span-System auf dem Feld ($\eta = 0,95$), des Elektromotors ($\eta = 0,85$) sowie der Mechanik ($\eta = 0,95$) berücksichtigt werden. Am IMN werden im „Energy-4-Agri“ Projekt (TU BRAUNSCHWEIG 2022a) – neben den ausschließlich batterie- und kontinuierlich-elektrischen Energieversorgungskonzepten – auch weitere Energieträger wie Wasserstoff im Projekt „H2Agrar“ (TU BRAUNSCHWEIG 2022b) und Biogas im Projekt „RegEnerMoBio“ (TU BRAUNSCHWEIG 2022c) untersucht.

In Abbildung 7 wird der Energiebedarf verschiedener elektrischer Antriebskonzepte anhand der Bodenbearbeitung verglichen: kontinuierliche Energieversorgung über ein Wide-Span-System zu einem elektrischen Fahrzeug, batterieelektrisches Fahrzeug, Brennstoffzellenfahrzeug (fuel cell vehicle = FCEV) und Fahrzeug mit wasserstoffbetriebenem Verbrennungsmotor, für das der Wasserstoff auf Basis erneuerbarer Energie gewonnen wurde (vehicle with internal combustion engine = ICV-H2).

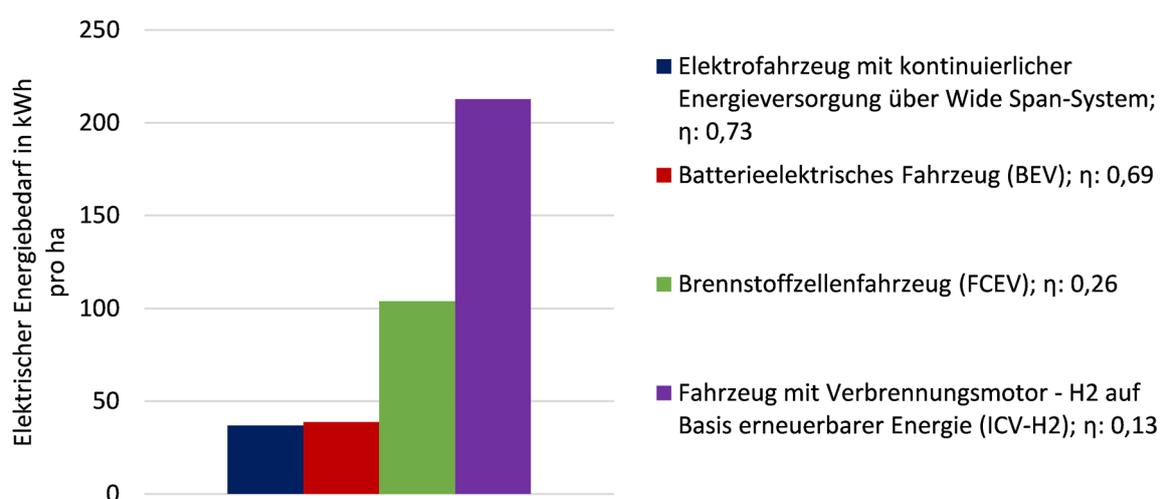


Abbildung 7: Vergleich unterschiedlicher Energieversorgungs- und Antriebskonzepte auf Basis erneuerbarer Energiequellen am Beispiel der Bodenbearbeitung unter Angabe der verwendeten Gesamtwirkungsgrade; Wirkungsgrade von BEV, FCEV und ICV nach ACATECH (2018)

Die Systemgrenze ist der Netz-Einspeisepunkt nach der Energie erzeugenden Anlage (Wind- und Sonnenenergie), sodass jeweils die gesamten Umwandlungsketten berücksichtigt werden. Für das kontinuierlich über ein Wide-Span-System mit Energie versorgte elektrische Fahrzeug und das batterieelektrische Fahrzeug gelten die bereits erwähnten Wirkungsgrade. Für das Brennstoffzellenfahrzeug wird ein Gesamtwirkungsgrad von $\eta_{FCEV} = 0,26$ veranschlagt, der die Stromübertragung von der Energie erzeugenden Anlage zum Elektrolyseur ($\eta = 0,95$), die Elektrolyse ($\eta = 0,7$), die Kompression und den Transport ($\eta = 0,8$), die Brennstoffzelle ($\eta = 0,6$), den Elektromotor ($\eta = 0,85$) sowie die Mechanik ($\eta = 0,95$) berücksichtigt. Für das Fahrzeug mit wasserstoffbetriebenen Verbrennungsmotor gilt ein Gesamtwirkungsgrad von $\eta_{ICV-H2} = 0,13$, in dem die Stromübertragung von der Energie erzeugenden Anlage zum Elektrolyseur ($\eta = 0,95$), die Elektrolyse ($\eta = 0,7$), die Umwandlung Power-to-Liquid ($\eta = 0,7$), die Übertragung des flüssigen Wasserstoffes ($\eta = 0,95$), der Verbrennungsmotor ($\eta = 0,3$) sowie die Mechanik ($\eta = 0,95$) berücksichtigt wird.

Unter Berücksichtigung dieser Wirkungsgrade wird für die Bewirtschaftung desselben Beispielfeldes mit einem Brennstoffzellenfahrzeug circa zweieinhalbmal so viel elektrische Energie wie mit einem batterieelektrischen Fahrzeug benötigt. Ein Fahrzeug mit wasserstoffbetriebenen Verbrennungsmotor benötigt sogar fünfeinhalbmal so viel elektrische Energie wie ein batterieelektrisches Fahrzeug. Der unterschiedliche Energiebedarf für die Durchführung derselben Verfahrensschritte liegt ausschließlich in der unterschiedlichen Effizienz, die es zu diskutieren gilt. Die Wirkungsgrade der Teilsysteme werden von anderen Autoren teilweise abweichend angegeben. So weisen SCHWADERLAPP und PLUMPE (2022) einem batterieelektrischen Fahrzeug anstatt des in diesem Artikel verwendeten Wirkungsgrades von $\eta_{BEV} = 0,69$ einen Wirkungsgrad von $\eta_{BEV} = 0,49$ zu; beide Wirkungsgrade berücksichtigen die gesamte Umwandlungsketten ab der Energie erzeugenden Anlage. Die unterschiedliche Effizienz besteht, da teilweise zusätzliche Teilsysteme in der Umwandlungskette berücksichtigt werden. Beispielsweise berücksichtigen SCHWADERLAPP und PLUMPE auf Netzebene zusätzlich einen Batterie-Zwischenspeicher mit einem Wirkungsgrad von $\eta = 0,86$. BEIDL (2022) veranschlagt für ein batterieelektrisches Fahrzeug – allerdings nur ab der Ladesäule bis inklusive der Mechanik des Fahrzeugs – einen Wirkungsgrad von $\eta_{BEV} = 0,5$ bis $0,65$. Auch bezüglich der Effizienz eines Brennstoffzellenfahrzeugs differieren die Angaben der ACATECH (2018) mit $\eta_{FCEV} = 0,26$ (ab Energie erzeugende Anlage bis inkl. Mechanik), SCHWADERLAPP und PLUMPE mit $\eta_{FCEV} = 0,21$ (ab Energie erzeugende Anlage bis inkl. Brennstoffzelle) und BEIDL mit $\eta_{FCEV} = 0,4$ bis $0,5$ (ab Wasserstofftankstelle bis inkl. Mechanik). Auch diese Differenz resultiert aus der Annahme unterschiedlicher Wirkungsgrade für die einzelnen Teilsysteme.

Im Vergleich mit den anderen Energieversorgungskonzepten wird deutlich, dass eine kontinuierliche elektrische Versorgung von Landmaschinen auf dem Feld im Effizienzvergleich durchaus valide erscheint. Das ist eine Kernaussage des vorliegenden Beitrags. Diese Betrachtung bedeutet jedoch nicht, dass eine kontinuierliche oder eine batterieelektrische Versorgung von Landmaschinen auf dem Feld immer die beste Option darstellt, da die Effizienz nur eines von vielen weiteren Bewertungskriterien ist, die es bei der Beurteilung neuer und herkömmlicher Systeme en détail zu betrachten gilt. Am Ende zählen für den Anwender insbesondere die landwirtschaftliche Nutzbarkeit und die Total Costs of Ownership (TCO). So kann ein Wide-Span-System, wie hier beschrieben, aufgrund der Geometrie des Gestängesystems prinzipbedingt nur auf rechteckigen und kostenbedingt nur auf großen Feldern sinnvoll installiert werden. Für einzelne Flächen in kleinstrukturierten Regionen erscheint es ungeeignet, es sei denn, eine Felder übergreifende Nutzung ist möglich. Dennoch kann

diskutiert werden, wie ein Wide-Span-System sinnvoll in ein bestehendes, komplexeres Feld-Polygon positioniert werden könnte, sodass die Gegebenheiten optimal genutzt werden. Im Rahmen des Energy-4-Agri Projektes wurde mit dem beteiligten Braunschweiger Institut für Geoökologie untersucht, ob die „übrigbleibenden“ Feldbereiche als Blühstreifen genutzt oder ob dort Agri-PV-Anlagen installiert werden könnten. Aus geoökologischer Perspektive wäre über solche Bereiche beispielsweise eine Verbesserung für die sogenannte Landschaftskonnektivität und damit für die Wanderung von Tieren und Organismen möglich, mit dem Effekt des Erhalts oder der Erhöhung der Biodiversität. Agri-PV-Anlagen würden auf diesen Flächen gegebenenfalls die wirtschaftliche Attraktivität solcher Ansätze erhöhen.

Schlussfolgerungen

Im vorliegenden Artikel wird ein Wide-Span-System in Anlehnung an eine Linearberegnungsanlage vorgestellt, das als Infrastruktursystem verschiedene Aufgaben in der Landwirtschaft übernehmen soll. Einerseits wird über das Gestängesystems kontinuierlich elektrische Energie für den Betrieb von Landmaschinen im Sinne eines Oberleitungskonzeptes bereitgestellt. Andererseits wird über die Rohrleitung des Gestängesystems bewässert sowie Dünge- und Pflanzenschutzmittel ausgebracht. Über diesen Ansatz sollen die Fahrten mit dem Düngerstreuer und der Pflanzenschutzspritze eingespart werden. Für die Installation des Wide-Span-Systems werden im Beitrag zwei Ausrichtungsvarianten vorgestellt, quer oder parallel zur Hauptarbeitsrichtung der Landmaschine. Die Verfahrenssimulation ergibt, dass der Energiebedarf der Ausrichtung quer zur Hauptarbeitsrichtung in allen landwirtschaftlichen Verfahren deutlich größer ist als für die Ausrichtung parallel zur Hauptarbeitsrichtung. Besonders bei kleinen Arbeitsbreiten ist der unterschiedliche Energiebedarf gravierend.

Letztlich werden neben den weiter zu untersuchenden technischen und landwirtschaftlichen Fragestellungen die Gesamtkosten (TCO) und die landwirtschaftliche Nutzbarkeit entscheidende Faktoren dafür sein, ob ein Wide-Span-System in der landwirtschaftlichen Praxis angewendet werden kann.

Literatur

- acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (2018): Coupling the different energy sectors – options for the next phase of the energy transition. <https://www.acatech.de/publikation/sektorkopplung-optionen-fuer-die-naechste-phase-der-energiewende/>, Zugriff am 14.08.2022
- American Society of Agricultural Engineers (ASAE) (1999): D497.4 MAR99 Agricultural Machinery Management Data. https://www.blogs.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/16/nrcseprd409629.pdf, Zugriff am 11.08.2022
- Bayrische Landesanstalt für Landwirtschaft (2008): Bewässerung im Ackerbau und in gärtnerischen Freilandkulturen. <https://docplayer.org/36344332-Bewaessering-im-ackerbau-und-in-gaertnerischen-freilandkulturen-lfi-information.html>, Zugriff am 11.08.2022
- Beidl, C. (2022): CO₂-neutrale Kraftstoffe – Potenziale, Einführungsoptionen und Anforderungen an die Antriebstechnologie. In: Fachgespräch Antriebssysteme für landwirtschaftliche Maschinen. Hg. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V., Darmstadt
- Blender, T.; Buchner, T.; Fernandez, B.; Pichlmaier, B.; Schlegel, C. (2016): Managing a mobile agricultural robot swarm for a seeding task. In: IECON 2016 – 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 23.–26.10.2016, Florence, pp. 6879–6886
- Breu, W.; Reuter, L. (2022): HELIOS – A hydrogen-electric operated tractor system. In: 7th International VDI Conference, 6–7 July 2022, Baden-Baden, S. 95–104

- Cullmann, L.; Daubermann, J.; Schrank, C.; Pickel, P. (2018): Abschlussbericht zum Verbundvorhaben – GridCON. Grid-Connected Agricultural Machine. <https://www.tib.eu/de/suchen/id/TIBKAT:1663010218/>, Zugriff am 11.08.2022
- Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (2019): DWA-Regelwerk: Merkblatt DWA-M 590. Grundsätze und Richtwerte zur Beurteilung von Anträgen zur Entnahme von Wasser für die Bewässerung, Hennef, 1. Aufl.
- Frerichs, L.; Buck, L. (2022): Structuring of electrified agricultural machine systems: Diversity of solutions and analysis methods. In: 79th International conference on agricultural engineering, VDI Wissensforum GmbH, 25.–26. Februar 2022, Hannover, VDI Verlag GmbH, S. 1–10
- Frerichs, L.; Thielke, L. (2014): New concepts of energy supply for sustainable agricultural systems. In: 72nd International conference on agricultural engineering, VDI Wissensforum GmbH, 19.–20. November 2014, Berlin, VDI Verlag GmbH, S. 315–324
- Hanke, S.; Trösken, L.; Frerichs, L. (2018): Development and parameterization of an object-oriented model for describing agricultural process steps. *Landtechnik* 73(2), S. 22–35
- Jöhrens, J.; Allekotte, M.; Heining, F.; Helms, H.; Räder, D.; Köllmermeier, N.; Waßmuth, V. (2022): Vergleichende Analyse der Potentiale von Antriebstechnologien für Lkw im Zeithorizont 2030. https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/2022-02-04_-_My_eRoads_-_Potentiale_Lkw-Antriebstechnologien_-_final_01.pdf, Zugriff am 11.08.2022
- Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (Hg.) (2016): Betriebsplanung Landwirtschaft 2016/17. Daten für die Betriebsplanung in der Landwirtschaft, Darmstadt, 25. Aufl.
- Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (2014): Technik der Freilandbewässerung. https://www.ktbl.de/fileadmin/user_upload/Artikel/Gartenbau/Freilandbewaesserung/Technik_Freilandbewaesserung.pdf, Zugriff am 11.08.2022
- Pierce Corporation (2004): P.93 Center Pivot System: Installation and operation manual. <https://piercecorporation.com/wp-content/uploads/2016/04/P93-Manual-complete.pdf>, Zugriff am 11.08.2022
- Rail Power Systems (2022): Grooved contact wire (DIN 43 141) – Wires and contact wires. <https://www.tracfeed-produkte.de/en/contact-line-components/accessories-wires-ropes-tubes/wires-and-contact-wires/c/grooved-contact-wire-din-43-141/>, Zugriff am 12.08.2022
- Reich, T. (2018): Beurteilung der Prüfprozesseignung bei Fahrzeugversuchen mit mobilen Arbeitsmaschinen. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), KIT Scientific Publishing
- Schwaderlapp, M.; Plumpe, A. (2022): CO₂ freie Antriebssysteme für Mobile Arbeitsmaschinen. In: Fachgespräch Antriebssysteme für landwirtschaftliche Maschinen. Hg. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V., Darmstadt
- Siebert, S.; Henrich, V.; Frenken, K.; Burke, J. (2013): Update of the Digital Global Map of Irrigation Areas to Version 5. https://www.researchgate.net/publication/264556183_Update_of_the_digital_global_map_of_irrigation_areas_to_version_5, Zugriff am 11.08.2022
- Smith, A.; North, S. (2009): Planning and Managing Centre Pivot and Linear Move Irrigation in the Southern Riverina. https://www.researchgate.net/publication/265739600_Planning_and_Managing_Centre_Pivot_and_Linear_Move_Irrigation_in_the_Southern_Riverina, Zugriff am 11.08.2022
- Smith, P.; Foley, J.; Priest, S.; Bray, S.; Montgomery, J.; Wigginton, D.; Schultz, J.; van Niekerk, R. (2014): A Review of Centre Pivot and Lateral Move Irrigation Installations in the Australian Cotton Industry. <https://www.cottoninfo.com.au/sites/default/files/documents/Centre%20Pivot%20Lateral%20Move%20Report.pdf>, Zugriff am 11.08.2022
- Stöhr, M.; Giglmaier, S.; Berlet, R. (2015): SESAM. Folgenabschätzung zum Einsatz batterie-betriebener vollelektrifizierter Landmaschinen. <https://www.baumgroup.de/fileadmin/interface/files/HDSAVATEVA-142016151526-CJTYIRXHHM.pdf>, Zugriff am 11.08.2022
- Trösken, L.; Meiners, A.; Frerichs, L.; Böttinger, S. (2020): Model-based Calculation of Fuel Consumption within Agricultural Process Chains. *Landtechnik* 75(4), S. 278–300, <https://doi.org/10.1515/LT.2020.3253>
- TU Braunschweig (2022a): Energy-4-Agri. Gesamtkonzept und Modellierung von Agrarsystemen mit regenerativer Energieversorgung. <https://www.tu-braunschweig.de/energy-4-agri>, Zugriff am 11.08.2022

TU Braunschweig (2022b): H2Agrar. Entwicklung einer grünen Wasserstoffmobilität für das Agrarland Niedersachsen. <https://h2agrar-niedersachsen.de/>, Zugriff am 11.08.2022

TU Braunschweig (2022c): RegEnerMoBio. Regenerative Energieversorgung für Netzautarke Mobilität durch Biogasanlagen. <https://www.tu-braunschweig.de/imn/forschung/verfahren-und-systeme>, Zugriff am 12.08.2022

United States Department of Agriculture (2019): 2017 Census of Agriculture. 2018 Irrigation and water management survey. https://www.nass.usda.gov/Publications/AgCensus/2017/Online_Resources/Farm_and_Ranch_Irrigation_Survey/fris.pdf, Zugriff am 13.08.2022

Autoren

M. Sc. Lennart Buck ist wissenschaftlicher Mitarbeiter und **Prof. Dr. Ludger Frerichs** ist Institutsleiter des Instituts für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge der TU Braunschweig, Langer Kamp 19a, 38106 Braunschweig, E-Mail: l.buck@tu-braunschweig.de.

Danksagung

Das Projekt „Energy-4-Agri“ wurde vom BMWK gefördert (Förderkennzeichen: 03EI1013A).