

Jürgen Karner, Rafael Eder, Thomas Holzer, Johann Wieser und Heinrich Prankl

Steer-by-wire-Lenkung eines Agro-Hybrid-Fahrzeuges mit Einzelradantrieb

Für die Landschaftspflege in alpinen Regionen wurde ein kompakter, fernbedienbarer Geräteträger mit einer modernen und effizienten Antriebstechnik entwickelt. Der neue Geräteträger bietet eine gute Wendigkeit, einen tiefen Schwerpunkt und ermöglicht bodenschonende Lenkungsarten. In diesem Beitrag wird speziell das Rad-Drehzahl- und das Lenkungsmodell des mit Einzelradantrieb ausgestatteten Fahrzeuges vorgestellt. Damit soll für verschiedene Lenkungsarten der bestmögliche Betrieb erreicht werden.

eingereicht 16. Dezember 2013

akzeptiert 18. Februar 2014

Schlüsselwörter

Lenkung, Steuerung, Hybrid-Fahrzeug, elektrischer Antrieb

Keywords

Steering, control, hybrid vehicle, electric drives

Abstract

Karner, Jürgen; Eder, Rafael; Holzer, Thomas; Wieser, Johann and Prankl, Heinrich

Steer-by-wire system of an agro-hybrid vehicle with single wheel drive

Landtechnik 69(2), 2014, pp. 78–83, 6 figures, 2 tables, 10 references

For landscape preservation a compact, remote controlled implement with modern and efficient drive technology has been developed. The new implement carrier offers good maneuverability, a low center of gravity and enables soil-protective steering modes. This paper focuses on the wheel-speed and steering models of this vehicle equipped with single-wheel drive, which enable best possible operation in different steering modes.

■ Produktivitätssteigerungen von Maschinen können durch größere Arbeitsbreiten, höhere Motorleistungen und höhere Arbeitsgeschwindigkeiten erzielt werden. Solcherart große Maschinen können aber im Berggebiet kaum eingesetzt werden. Ein wichtiger Aspekt bei der Bearbeitung von Hanglagen ist es, die Sicherheit des Maschinenführers zu gewährleisten. Dafür wurde ein fernbedienbarer Geräteträger entwickelt, bei dem der Bediener sich an einem sicheren Standplatz befindet, während die Maschine im unwegsamen Gelände arbeitet. Zunächst wird die Maschine bei den Anwendungen Mähen, Mulchen und Schnee fräsen eingesetzt. Aufgrund der maschinen-typischen Eigenschaften ist davon auszugehen, dass sich die Einsatzgebiete stetig erweitern werden.

Systemaufbau

Elektrische Antriebstechnik ist aufgrund ihrer guten Regelbarkeit und des hohen Wirkungsgrades für ausgewählte Anwendungen in der Landtechnik vielversprechend. Zusätzlich können auch neue Funktionen und Maschinenkonzepte realisiert werden [1; 2; 3]. Beim vorgestellten Geräteträger handelt es sich grundsätzlich um ein Fahrzeug mit seriellem Hybridantrieb [4; 5], die Kenndaten des Fahrzeuges sind in **Tabelle 1** aufgeführt. Eine Verbrennungskraftmaschine (VKM) treibt zwei 24-VDC-Generatoren. Die elektrische Energie wird in konventionellen Bleibatterien zwischengespeichert. Der Controller steuert die vier Radmotoren an. Somit kann die Fahrgeschwindigkeit stufenlos variiert werden. Die Zapfwelle wird über ein mechanisches Getriebe von der VKM angetrieben (**Abbildung 1**). Auf eine Hydraulikanlage ist gänzlich verzichtet worden. Die Lenk- und Hubwerksbewegungen werden von elektrischen Linearantrieben übernommen. Die gewählte Architektur erlaubt Hybridfunktionen wie Rekuperation oder einen rein elektrischen

Tab. 1

Kenndaten des Hybrid-Fahrzeuges

Table 1: Hybrid vehicle specifications

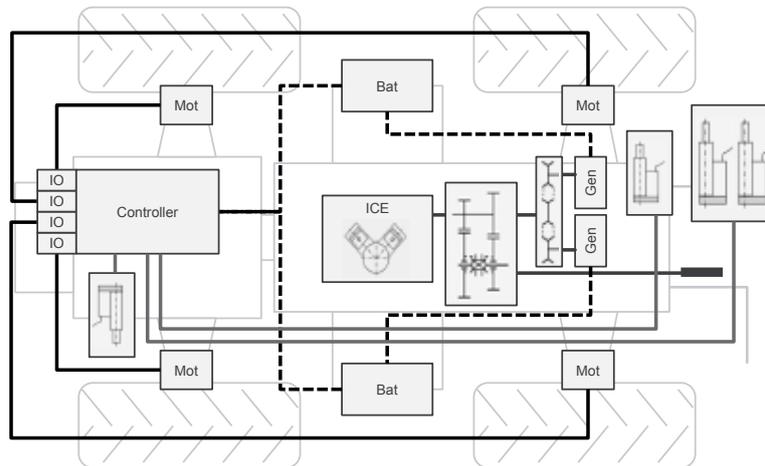
VKM-Leistung/ICE power	30 kW
Nennleistung der Radmotoren Wheel motors' nominal power	4 x 1,3 kW
Zapfwelldrehzahl PTO speed	540 und 1000 U/min 540 and 1000 rpm
Gesamtmasse (ohne Geräte) Total mass (w/o implement)	660 kg
Radstand/Wheel base	1302 mm
Wenderadius (Vierradlenkung) Turning radius (all wheel steering)	1200 mm
Fahrzeuglänge/Vehicle length	2380 mm
Fahrzeughöhe/Vehicle height	950 mm

Fahrbetrieb. Außerdem sind mehrere Lenkungsmodi wie Vorderachs-, Hinterachs-, Vierradlenkung und Hundegang möglich.

Der Fahrzeugrahmen verfügt über ein zentrales Drehgelenk, sodass Vorder- und Hinterachse um 35° gegeneinander verdreht werden können. Dadurch sind ein optimaler Reifen-Boden-Kontakt und eine gleichmäßige Lastverteilung möglich. Im vorgestellten Konzept mit Einzelradantrieb ist die maximale Fahrleistung durch die Leistung der Radmotoren begrenzt und nicht durch die Leistung des Verbrennungsmotors. Angekoppelte Geräte werden über ein elektrisch betriebenes Hubwerk (Kategorie 0 und 1) angehoben und aus Effizienzgründen direkt mechanisch über die Zapfwelle betrieben.

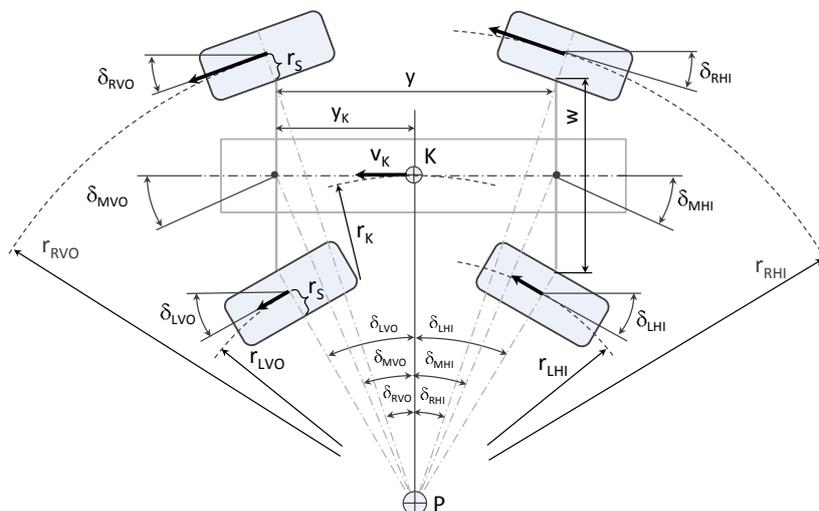
Durch den Einzelradantrieb gibt es keine mechanischen Differenziale mehr. Stattdessen muss deren Funktion durch die Ansteuerung der einzelnen Räder in jeder Fahrsituation emuliert werden. Hierfür ist es notwendig, das kinematische Modell

Abb. 1



Systemaufbau des Hybrid-Geräteträgers mit variablem elektrischen Fahrtrieb und zweistufigem mechanischen Zapfwellenantrieb
Fig. 1: System architecture of the hybrid implement carrier with variable electric traction drive and two-speed mechanical PTO-drive

Abb. 2



Lenkwinkel können auch am Momentanpol P abgelesen werden
Fig. 2: Steering angles can also be found nearby instantaneous center P

der Lenkung und das Geschwindigkeitsmodell der Einzelräder für die verfügbaren Lenkungsarten in die Regelstrategie zu integrieren. Die notwendigen Modelle für die jeweiligen Raddrehzahlen werden für die geforderten Fahrzeuggeschwindigkeiten und Lenkwinkel abgeleitet.

Lenkung

Beide Achsen sind mit elektrisch angetriebenen Lineareinheiten zum Lenken ausgestattet, sodass mehrere Lenkarten möglich sind. In früheren Arbeiten wurden bereits Fahrzeuge mit verschiedenen Lenkmodi vorgestellt, die entweder über Achs- bzw. Einzelradantrieb verfügen [6; 7; 8]. Im vorliegenden Projekt wurden als Lenksysteme die Vierrad-Lenkung, die Vorderachs- und Hinterachslenkung sowie der Hundegang implementiert, da beide Achsen unabhängig voneinander angesteuert werden

können. Bei einer idealen Lenkungs kinematik stehen die Räder tangential zum gewünschten Kurvenpfad. Bei konstantem Lenkwinkel haben dann alle Trajektorien denselben Momentanpol P. Folglich müssen die inneren Räder einen größeren Lenkwinkel haben als die äußeren. Dieses Prinzip wird als Ackermann-Lenkung bezeichnet [9]. Die Lenkwinkeldifferenz zwischen inneren und äußeren Rädern nimmt bei größerer Spurweite und kürzerem Radstand zu. Beim Einzelradantrieb muss jedes Rad entsprechend dem jeweiligen Lenkwinkel angesteuert werden. Dafür werden mit einer Fernbedienung Lenkungsart, Fahrzeuggeschwindigkeit und mittlerer Lenkwinkel vorgegeben. Daraus werden dann die notwendigen Bewegungen des Lenkaktuators und die jeweiligen Raddrehzahlen berechnet. Die Fahrzeuggeschwindigkeit v_K wird auf den Fahrzeugreferenzpunkt K bezogen, der sich an der Fahrzeuglängsachse auf einer Normalen durch den Momentanpol P befindet. Das Lenktrapez wurde so konstruiert, dass bei Vierradlenkung die Ackermann-Bedingung bestmöglich erfüllt wird. Die folgenden Berechnungen wurden für die Vierradlenkung angestellt.

Tab. 2

Verzeichnis der Formelzeichen

Table 2: List of abbreviations

δ_M	Fahrzeuglenkwinkel / Vehicle steering angle
δ_{MVO}	Mittlerer Lenkwinkel an der Vorderachse Mean steering angle at the front axle
δ_{MHI}	Mittlerer Lenkwinkel an der Hinterachse Mean steering angle at the rear axle
δ_{RVO}	Lenkwinkel am rechten Vorderrad Steering angle at the right front wheel
δ_{LVO}	Lenkwinkel am linken Vorderrad Steering angle at the left front wheel
y_K	Radstand / Wheel base
w	Abstand der Lenkachsen (links-rechts) Distance of the king pins (left-right)
δ_{LHI}	Lenkwinkel am linken Hinterrad Steering angle at the left rear wheel
δ_{RHI}	Lenkwinkel am rechten Hinterrad Steering angle at the right rear wheel
r_K	Kurvenradius des Fahrzeugbezugspunktes K (Polabstand \overline{PK}) Turning radius of the vehicle reference point K (pole distance \overline{PK})
r_{LVO}	Kurvenradius am linken Vorderrad Turning radius of the left front wheel
r_{LHI}	Kurvenradius am linken Hinterrad Turning radius of the left rear wheel
r_{RVO}	Kurvenradius am rechten Vorderrad Turning radius of the right front wheel
r_{RHI}	Kurvenradius am rechten Hinterrad Turning radius of the right rear wheel
v_{LVO}	Geschwindigkeit am linken Vorderrad Speed at the left front wheel
v_{LHI}	Geschwindigkeit am linken Hinterrad Speed at the left rear wheel
v_{RVO}	Geschwindigkeit am rechten Vorderrad Speed at the right front wheel
v_{RHI}	Geschwindigkeit am rechten Hinterrad Speed at the right rear wheel
r_S	Lenkrollradius / Scrub radius

Berechnung der Ackermann-Lenkungswinkel

Die geforderten mittleren Fahrzeuglenkwinkel werden an der Vorder- und Hinterachse aufgetragen und haben dieselben Beträge (**Abbildung 2** und **Tabelle 2**):

$$|\delta_M| = |\delta_{MVO}| = |\delta_{MHI}| \quad (\text{Gl. 1})$$

Die jeweiligen Radlenkwinkel können mittels der cot-Funktion aus dem mittleren Lenkwinkel, dem Radstand und der um den Lenkrollradius verringerten Spurweite berechnet werden (**Abbildung 2**):

$$\delta_{RVO} = \text{arccot} \left(\cot(\delta_M) + \frac{w}{2 \cdot y_K} \right) \quad (\text{Gl. 2})$$

$$\delta_{LVO} = \text{arccot} \left(\cot(\delta_M) - \frac{w}{2 \cdot y_K} \right) \quad (\text{Gl. 3})$$

Zum gleichen Ergebnis kommt Saxinger in [10], mit dem Unterschied, dass hier die tan-Funktion verwendet wird:

$$\delta_{LVO} = \arctan \left(\frac{2 \cdot y_K \cdot \tan(\delta_M)}{2 \cdot y_K - w \cdot \tan(\delta_M)} \right) \quad (\text{Gl. 4})$$

$$\delta_{RVO} = \arctan \left(\frac{2 \cdot y_K \cdot \tan(\delta_M)}{2 \cdot y_K + w \cdot \tan(\delta_M)} \right) \quad (\text{Gl. 5})$$

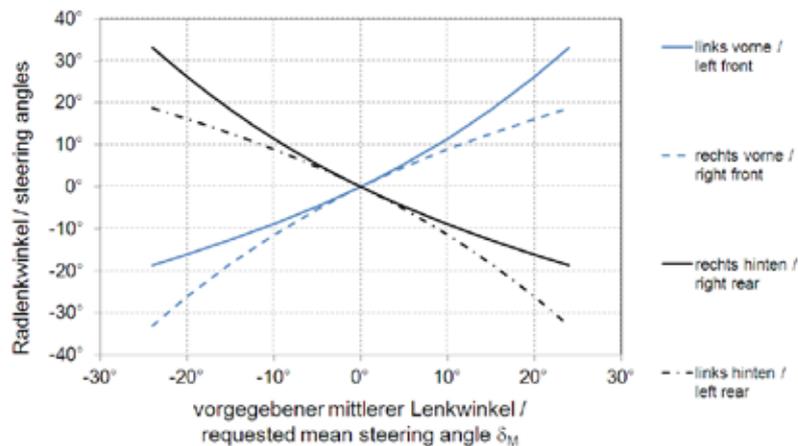
Bei Vierradlenkung sind die Beträge der Lenkwinkel innen bzw. außen gleich groß:

$$|\delta_{LHI}| = |\delta_{LVO}| \quad (\text{Gl. 6})$$

$$|\delta_{RHI}| = |\delta_{RVO}| \quad (\text{Gl. 7})$$

Die berechneten Lenkwinkel jedes Rades sind in **Abbildung 3** dargestellt. Für eine Linkskurve mit einem mittleren Fahrzeug-Lenkungswinkel von 20° müssen die Innenräder (links vorne und hinten) mit $26,1$ bzw. $-26,1^\circ$ und die Außenräder

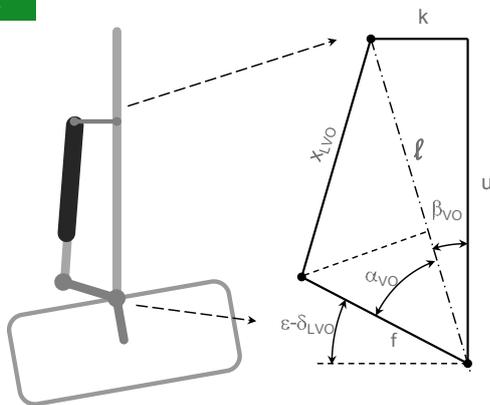
Abb. 3



Lenkwinkel jedes Rades in Abhängigkeit des mittleren Fahrzeug-Lenkwinkels

Fig. 3: Steering angle of each wheel at given mean steering angle

Abb. 4



Kinematik am Vorderachs-Lenkaktuator

Fig. 4: Kinematics at the front steering actuator

(rechts vorne und hinten) mit 16,1 bzw. -16,1° eingelenkt werden, um die Ackermann-Bedingung zu erfüllen. Die Lenkaktuatoren an der Vorder- und Hinterachse müssen entsprechend angesteuert werden, wobei der Aktuator an der Vorderachse ausfahren, jener an der Hinterachse einfahren muss. Die erforderlichen Längen (Hübe) können mittels Trigonometrie berechnet werden (**Abbildung 4**).

Berechnung der Radgeschwindigkeiten

Sämtliche Lenkachsen stehen ohne Sturz. Da die via Fernbedienung vorgegebene Fahrzeuggeschwindigkeit am Punkt K angreift, wird zunächst der Polabstand berechnet:

$$r_K = \frac{y_K}{\tan(\delta_{MVO})} \quad (\text{Gl. 8})$$

Anschließend werden die Radien der einzelnen Räder berechnet:

$$r_{LVO} = r_{LHI} = \frac{y_K}{\sin(\delta_{LVO})} - r_S \quad (\text{Gl. 9})$$

$$r_{RVO} = r_{RHI} = \frac{y_K}{\sin(\delta_{RVO})} + r_S \quad (\text{Gl. 10})$$

Die Fahrzeugbewegung mit einem Fahrzeuglenkwinkel kann als Drehbewegung um den Momentanpol P aufgefasst werden. Die individuellen Radgeschwindigkeiten sind somit:

$$v_{LVO} = v_{LHI} = v_K \cdot \frac{r_{LVO}}{r_K} \quad (\text{Gl. 11})$$

$$v_{RVO} = v_{RHI} = v_K \cdot \frac{r_{RVO}}{r_K} \quad (\text{Gl. 12})$$

Die vorgegebene Fahrzeuggeschwindigkeit kann somit mit einem Faktor multipliziert werden, um die für die gewünschte Kurvenfahrt notwendigen Radgeschwindigkeiten zu erhalten. Die Geschwindigkeitsfaktoren stehen in Abhängigkeit zum mittleren Fahrzeuglenkwinkel (**Abbildung 5**). Bei positivem mittleren Lenkwinkel wird bei Vorwärtsfahrt eine Linkskurve durchfahren. Die Innenräder (linke Fahrzeugseite) weisen dabei eine geringere Geschwindigkeit als die Außenräder (rechte Fahrzeugseite) auf. Da das Lenktrapez für die Vierradlenkung optimiert wurde, kann die Ackermann-Bedingung für die restlichen Lenkungsarten nur angenähert werden. Dennoch wurde für die Berechnung der jeweiligen Radgeschwindigkeiten die Ackermann-Bedingung angewandt. In praktischen Versuchen mit Vorder- und Hinterachslenkung sowie Hundegang konnte eine gute Steuerbarkeit erreicht werden.

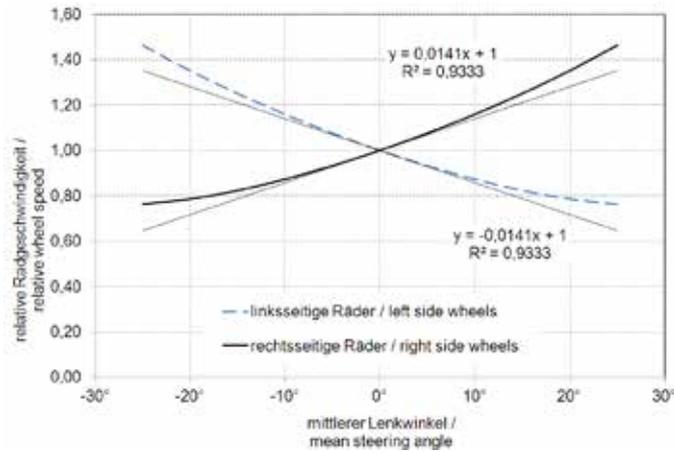
Synchrone Steuerung von Fahrtrieb und Lenkung

Jeder Radmotor wird einzeln angesteuert. Zusätzlich muss die Ansteuerung von Fahrtrieben und Lenkaktuatoren zeitlich synchronisiert werden. Andernfalls könnten z.B. stillstehende Radmotoren die Bewegung der Lenkaktuatoren behindern. Für die Implementierung der Reglerstrategie wurde ein weit verbreitetes SPS-System verwendet, das über mehrere analoge und digitale Ein-/Ausgänge und einen CAN-Bus zur Kommunikation mit externer Hardware verfügt.

Bedienung

Die Fahrzeuggeschwindigkeit und der Fahrzeuglenkwinkel werden mit einer Funkfernbedienung vorgegeben. Die Vor-/

Abb. 5

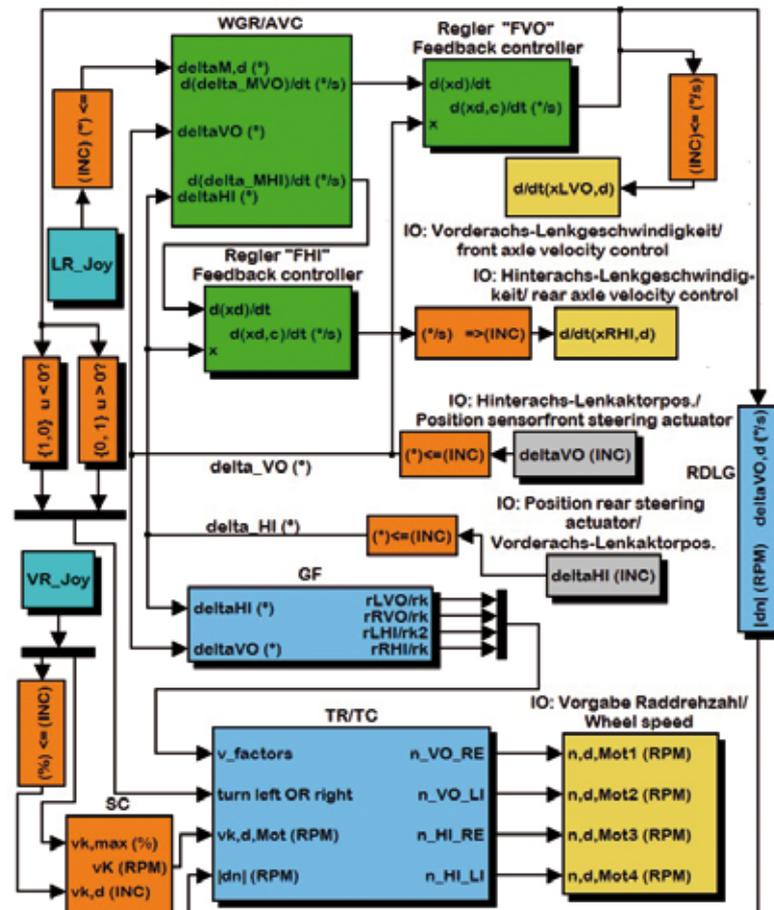


Relative Radgeschwindigkeit bei unterschiedlichen mittleren Lenkwinkeln im Lenkmodus Allradlenkung
 Fig. 5: Relative wheel speed at various mean vehicle steering angles in all-wheel steering mode

Rückbewegung an einem der beiden Joysticks definiert Fahr- richtung und -geschwindigkeit. Die Maximalgeschwindigkeit kann mit einem Drehknopf an der Fernbedienung eingestellt werden. Die Lenkungsart kann durch Drücken eines der vier Taster gewählt werden. Das Lenken erfolgt durch Links-/

Rechtsbewegung des zweiten Joysticks. Eine elektro-mechani- sche Kupplung stellt die Verbindung zwischen Verbrennungs- motor und Zapfwelle für den Geräteantrieb her. Die Kupplung kann ebenfalls per Fernbedienung geschaltet werden. Das An- heben/Absenken des gekoppelten Gerätes erfolgt durch Vor-/

Abb. 6



Regelung für das Agro-Hybrid-Fahrzeug mit Einzelradantrieb
 Fig. 6: Closed loop control for steering of an agro-hybrid vehicle with single wheel drive

Rückbewegung des zweiten Joysticks. Der Verbrennungsmotor kann per Funk gestartet oder abgeschaltet werden, außerdem kann die Drehzahl eingestellt werden. In Kombination mit Anbaugeräten sind hier noch viele weitere Funktionen möglich. Am Fahrzeug befindet sich ein Display, über das Fahrzeuginformationen, wie zum Beispiel Lenkwinkel, Batteriespannung und Motortemperaturen, angezeigt werden können.

Regelkonzept

Der Regel-Algorithmus muss folgende Aufgaben erledigen:

- Berechnung der notwendigen Lenkaktuator-Bewegungen an Vorder- und Hinterachse (aus Trigonometrie, **Abbildung 4**)
- Berechnung der notwendigen Raddrehzahlen aus Gleichung 11 und 12

Abbildung 6 zeigt den Regelkreis des Fahrzeugs mit den Eingängen und Ausgängen (Inputs/Outputs IO, **Abbildung 1**). Die grauen Blöcke stellen Eingänge aus gemessenen Positions-Inkrementen der Lenkaktuatoren in den Regelkreis dar. Gelb markiert sind die Blöcke mit den Ausgängen des Regelkreises, welche die Sollsignale an die Servoregler der Einzelradantriebe bzw. die Regler der Lenkaktuatoren weitergeben. Die orangefarbenen Blöcke sind Einheitsumwandlungen bzw. Auswertungen der Lenkrichtung. Grün sind die Blöcke für die Berechnung der Sollgeschwindigkeit der Lenkaktuatoren dargestellt. Die blauen Blöcke enthalten Berechnungen, die für die Berechnung der Soll-Drehzahl der Einzelradantriebe essenziell sind.

Die Blöcke VR_Joy und LR_Joy sind die Eingangsgrößen der Fernbedienung und beziehen sich auf Vor/Rück- bzw. Links/Rechts-Bewegungen der Joysticks am Bedienpanel. Der Winkelgeschwindigkeitsregler WGR berechnet je nach gewähltem Lenkungsmodus die Lenkwinkel-Geschwindigkeit. Die Lenkwinkel-Geschwindigkeits-Regler für vorne (FVO) und hinten (FHI) transformieren die Outputs des WGR in lineare Trajektorien der benutzerdefinierten Lenkwinkel-Geschwindigkeiten (**Abbildung 6**). Die Grenzen des Lenkwinkels werden laufend überwacht.

Der Betrag der additiven Raddrehzahl – verursacht durch Änderungen der Lenkwinkelgeschwindigkeit –, die das Lenken im Stillstand ermöglicht, wird im Block RDLG berechnet. Die Berechnung der Geschwindigkeitsfaktoren ist im Block GF implementiert. Die Traktions-Regelung TR benutzt die multiplikativen Geschwindigkeitsfaktoren von GF und die additiven Radgeschwindigkeiten von FFC und berechnet die jeweils erforderlichen Raddrehzahlen.

Schlussfolgerungen

Bei dem neuen Fahrzeugkonzept für einen Hybrid-Geräteträger zur Bewirtschaftung von Steifflächen treibt ein Verbrennungsmotor die Zapfwelle mechanisch an. Der stufenlose Fahrentrieb ist als Einzelradantrieb in serieller Hybridstruktur ausgeführt. Aktuell sind vier Lenkungsarten implementiert. Auf eine Hydraulikanlage wurde verzichtet. Als weitere Lenkungsart wird die sog. Komfortlenkung angedacht. Dabei liegt der Momentanpol

auf Höhe des Anbaugerätes, sodass dieses bei kleineren Lenkbewegungen keine Seitwärtsbewegung ausführt. Die Lenkbewegung und das Hubwerk wurden elektrisch ausgeführt. Die erforderlichen Einzelrad-Drehzahlen wurden nach der Ackermann-Bedingung berechnet und in die Regelung implementiert.

Eine mögliche zukünftige Anwendung könnte das autonome Fahren im Feld sein. Hierfür muss das Fahrzeug mit einem GPS-System ausgerüstet werden. Die Pfade können zunächst mittels Software-Anwendung definiert werden. Somit können beispielsweise Pflanzenschutzapplikationen fahrerlos durchgeführt werden.

Literatur

- [1] Aumer, W.; Lindner, M.; Geißler, M.; Herlitzius, Th. (2008): Elektrischer Traktor – Vision oder Zukunft? Landtechnik 63(1), S. 14–15
- [2] Karner, J. (2012): Electric Drives in Agricultural Machinery. International Conference in Agricultural Machinery, CIGR, EurAgEng, 9–12 July 2012, Valencia
- [3] Schmid, B. (2011): Elektrischer Radantrieb. die grüne 21, S. 31–33
- [4] Hofmann, P. (2010): Hybridfahrzeuge – Ein alternatives Antriebskonzept für die Zukunft. Wien, Springer Verlag
- [5] Karner, J.; Baldinger, M.; Schober, P.; Reichl, B.; Prankl, H. (2013): Hybridsysteme für die Landtechnik. Landtechnik 68(1), S. 22–25
- [6] Seelke, C. (2008): Lenkungs-konzepte eines vielfältig einsetzbaren Systemfahrzeuges. Land.Technik 2008, VDI-Berichte Nr. 2045, S. 53–59
- [7] Geißler, M.; Aumer, W.; Lindner, M.; Herlitzius, Th. (2010): Elektrifizierte Einzelradantriebe in mobilen Landmaschinen. Landtechnik 65(5), S. 368–371
- [8] Reform-Werke Bauer: Reform Mounty Hanggeräteträger – Produktmerkmale. Reform-Werke Bauer, Wels, <http://www.reform.at/de/landwirtschaft/mounty-hanggeraetetraeger/produktmerkmale.html>, Zugriff am 10.3.2014
- [9] Pfeffer, P.; Harrer, M. (2011): Lenkungs-handbuch. Vieweg + Teubner Verlag, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH
- [10] Saxinger, M. (2011): Modellierung und Analyse einer hydrostatischen Traktorlenkung hinsichtlich regelungstechnischer Aspekte. Diploma Thesis JKU Linz, Institute of Automatic Control and Control Systems Technology

Autoren

Dr. Dipl.-Ing. Jürgen Karner ist Senior Researcher bei Josephinum Research, A-3250 Wieselburg, E-Mail: juergen.karner@josephinum.at

Dipl.-Ing. Rafael Eder ist R & D Engineer am Linz Center of Mechatronics in A-4040 Linz

Thomas Holzer ist geschäftsführender Gesellschafter von Profiteam Holzer GmbH in A-8692 Neuberg/Mürz

Mag. Johann Wieser ist Professor für Mathematik am Lehr- & Forschungszentrum Francisco Josephinum in A-3250 Wieselburg

Dipl.-Ing. Heinrich Prankl ist Leiter für Forschung & Innovation an der BLT in A-3250-Wieselburg

Danksagungen und Hinweise

Die Arbeit entstand im Rahmen des Forschungsprogramms Future Farm Technology (FFT). Es wird gefördert aus Mitteln des COMET Programms der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft. Die Autoren danken der Unterstützung im Rahmen des K2-Zentrums Austrian Center of Competence in Mechatronics, LCM.

Die Autoren danken auch Herrn Robert Frass für seine Vorarbeiten.

Das Thema wurde auf der VDI-Tagung LAND.TECHNIK 2013, Hannover, 8.–9. November 2013, vorgestellt und eine Kurzfassung im VDI-Bericht veröffentlicht (Bd. 2193, S. 213–224).