

Christoph Dillmann, Bernd Johanning, Michael Kreyenhagen und Jens Meyer

Intelligentes Lenken

Bei modernen mehrachsigen Starrdeichselanhängern mit großvolumigen Rädern ist eine Lenkung von mindestens einer Achse unumgänglich. Hydraulische Zwangslenkungen und Nachlaufenkungen haben große systembedingte Nachteile und sind in ihrer Funktionalität begrenzt. Vor diesem Hintergrund wurde eine elektrohydraulische Allradlenkung entwickelt, bei der alle Achsen unabhängig voneinander gelenkt werden können. Die daraus resultierenden möglichen Lenkstrategien wie die „In-Spur-Fahrt“ oder der „Hundegang“ ermöglichen eine auf den Anwendungsfall abgestimmte Lenkungsart und dadurch eine Verbesserung der Rangierbarkeit, Boden- und Pflanzenschonung sowie eine geringere Reifenabnutzung.

Schlüsselwörter

Elektrohydraulische Lenkung, Starrdeichselanhänger, Flüssigmisttankwagen, Lenkungssystem

Keywords

Electro-hydraulic control, drawbar trailer, liquid manure trailer, steering system

Abstract

Dillmann, Christoph; Johanning, Bernd; Kreyenhagen, Michael and Meyer, Jens

Intelligent steering

Landtechnik 67 (2012), no. 4, pp. 260–264, 7 figures, 5 references

When analyzing modern multiaxial central axle trailers with large-volume wheels, it is clear a steering system of at least one axle is inevitable. Hydraulic positive steering systems and self-steering systems are synonymous with insuperable disadvantages and limited in their functionality. With this in mind, an electro-hydraulic all-wheel steering system was developed in which all axles are steered independently of each other. The resulting possible steering strategies such as the “in track mode” or “crab steering” allow an application-specific steering mode resulting in an improvement of the maneuverability, protection of the soil and plants and less tire wear.

■ Sowohl Zwangslenkungs- als auch Nachlaufenkungssysteme sind in der Praxis weit verbreitet. Beide Lenksysteme besitzen allerdings systembedingte Nachteile. Bei der Zwangslenkung werden durch das hydraulische Verdränger-Prinzip große

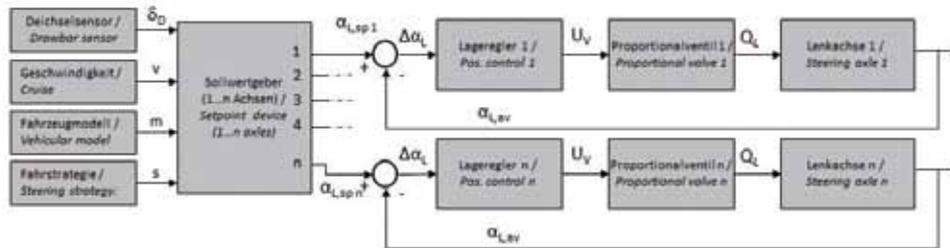
Kräfte über die Lenkzylinder in den Traktor eingeleitet. Ferner kann ein Radieren der Räder durch die feste Lenkübersetzung nicht ausgeschlossen werden. Die Nachlaufenkung mit einer freien Achse neigt bei höheren Geschwindigkeiten zur Instabilität. Für die Rückwärtsfahrt muss die Nachlaufenkung zudem gesperrt werden. Eine elektrohydraulische Lenkung weist keine dieser Nachteile auf und kann zusätzliche Funktionalitäten bieten. In Zusammenarbeit mit der Kotte Landtechnik GmbH wurde an der Hochschule Osnabrück eine elektrohydraulische Allradlenkung (**Abbildung 1**) als Steer-by-Wire-Lösung für Starrdeichselanhänger entwickelt. Folgende funktionale Ziele standen hierbei im Mittelpunkt:

- genormte Schnittstelle zum Traktor (ISO 26402)
- CAN-Bus-Schnittstelle zu anderen Bediensystemen
- autarkes System für alle Starrdeichselanhänger
- Verbesserung des Fahrverhaltens
- kein Radieren der Räder
- zusätzliche Lenkfunktionen (z. B. Hundegang)
- zulassungsfähiges Lenksystem



Elektrohydraulische Lenkanlage installiert an einem 4-Achser
Fig. 1: Elektro-hydraulic steering system implemented in an eight wheeler

Abb. 2



Systemaufbau
Fig. 2: System structure

Systembeschreibung

Haupteingangsgröße für das gesamte elektrohydraulische Lenksystem ist der Deichselwinkelsensor zwischen Zugfahrzeug und Anhänger. Anhand des gemessenen Deichselwinkels werden die Radeinschlagwinkel mithilfe eines Fahrzeugmodells berechnet und den einzelnen Achsen als Sollwert vorgegeben. **Abbildung 2** zeigt das Blockschaltbild für das Lenksystem. Der für jede Achse berechnete Sollwert ist die Vorgabe für einen elektrohydraulischen Lageregelkreis [1].

Das elektrohydraulische Allradlenksystem erlaubt durch die individuelle Ansteuerung einzelner Achsen verschiedene Lenkstrategien, die im Folgenden kurz erläutert werden.

In-Spur-Fahrt

Die oberste Priorität bei der In-Spur-Fahrt ist der Schutz der Pflanzen. Hierbei folgt das angehängte Fahrzeug exakt der Spur des Zugfahrzeuges. Dadurch ist das Gespann besonders wendig und das Radieren der Räder wird auf ein Minimum reduziert. Diese Lenkstrategie ist besonders für das Fahren in Spritzgasen geeignet, da eine Beschädigung des Bestandes durch das Einscheren des Anhängers vermieden wird.

Hundegang

Beim spurversetzten Fahren, dem Hundegang, liegt das Hauptaugenmerk auf einer möglichst geringen Verdichtung des Bodens. Durch das gleichmäßige Auslenken der Räder verlässt das angehängte Fahrzeug die Schlepperspur, sodass jedes Rad eine eigene Fahrspur nutzt und somit die Gesamtlast auf mehrere Fahrspuren verteilt wird.

Hangabdrift

Anhänger mit hydraulischen Zwanglenkungsanlagen neigen beim hangparallelen Fahren zum Abrutschen. Die Hangabdriftfunktion bietet den Fahrzeugführern die Möglichkeit durch automatisches hangaufwärtsgerichtetes Gegenlenken schwierige Passagen sicher zu durchfahren.

Nachlauflenkung/Zwanglenkung

Bei dieser Lenkstrategie wird mit einer gesperrten Achse gefahren. Im Unterschied zur herkömmlichen hydraulischen Zwanglenkung besteht keine feste Lenkübersetzung. Die ge-

lenkten Achsen werden jederzeit zum Momentanpol ausgerichtet, wodurch der Reifenverschleiß reduziert wird. Aufgrund der Sperrung einer Achse ist das Fahrverhalten besonders beim Einscheren mit dem von anderen Lenksystemen vergleichbar und erfordert keine Umgewöhnung des Fahrers.

Alle Achsen zentriert

Des Weiteren können die Achsen des Anhängers in Nullstellung (Geradeausfahrt) gesperrt werden. Der Wert des Deichselwinkels wird hierbei nicht berücksichtigt, sodass zum Beispiel ein geradliniges Rückwärtsfahren einfach möglich ist [2].

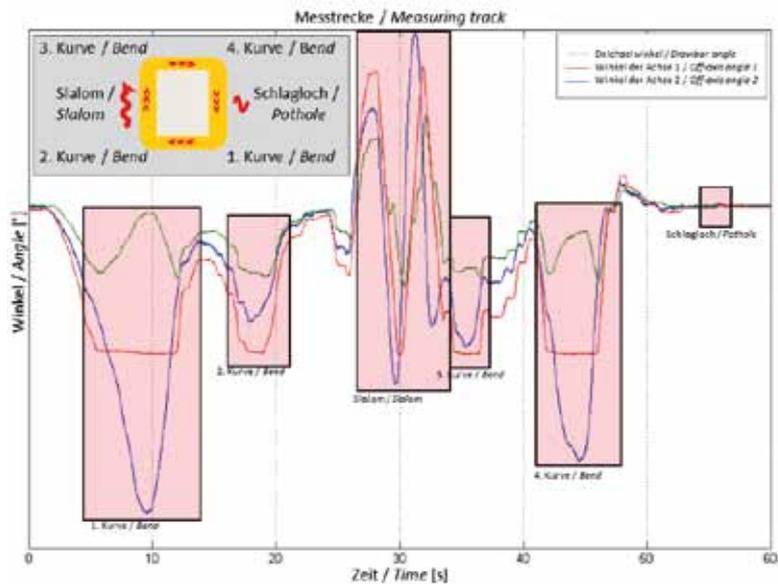
Funktionserprobung und Deichselwinkelsensor

Zentrales Element für die Umsetzung der elektrohydraulischen Allradlenkung im Funktionsmuster war ein „Rapid Control Prototyping System“ (Matlab/Simulink und DSpace-Box). Mit diesem wurden der Systemaufbau, die Programmierung und die Fahrversuche innerhalb von wenigen Monaten durchgeführt. Letztere wurden mit dem Funktionsmuster auf einer Teststrecke, die verschiedene charakteristische Merkmale (Bodenwelle, Schlagloch, Slalom) enthielt, absolviert. Anhand des Messschriebes (**Abbildung 3**) ist das In-Spur-Verhalten auf dem Rundkurs zu erkennen. Aus dem positiven Deichselwinkel in Kurve 1 resultieren negative Radeinschlagswinkel an den Lenkachsen 1 und 2. Der Anhänger läuft ohne Radieren in der Spur der Schlepperhinterachse. Bei Erreichen des Endanschlags der Achse 2 muss die Strategie der In-Spur-Fahrt verlassen werden. Um das radierungsfreie Abrollen der Räder beizubehalten, muss bei größer werdendem Deichselwinkel die Achse 2 vollauss gelenkt bleiben und die Achse 1 zurücklenken. Des Weiteren ist für ein radierungsfreies Abrollen entscheidend, dass kleine Änderungen am Deichselwinkel eine unmittelbare Änderung für die Sollposition der Räder zur Folge haben. Daraus resultiert die besondere Bedeutung für das fehlerlose Messen des Deichselwinkels [1].

Die Deichselwinkel Aufnahme erfolgte zunächst über einen oberhalb der Deichsel angeordneten Drehwinkelsensor. Nachteilig der außermittig positionierten Sensoreinheit ist der dadurch entstehende starke Einfluss von Nick- und Wankbewegungen (**Abbildung 4**).

Aus diesem Grund wurde ein Deichselwinkelsensor entwickelt, der die Nick- und Wankbewegungen mechanisch entkoppelt.

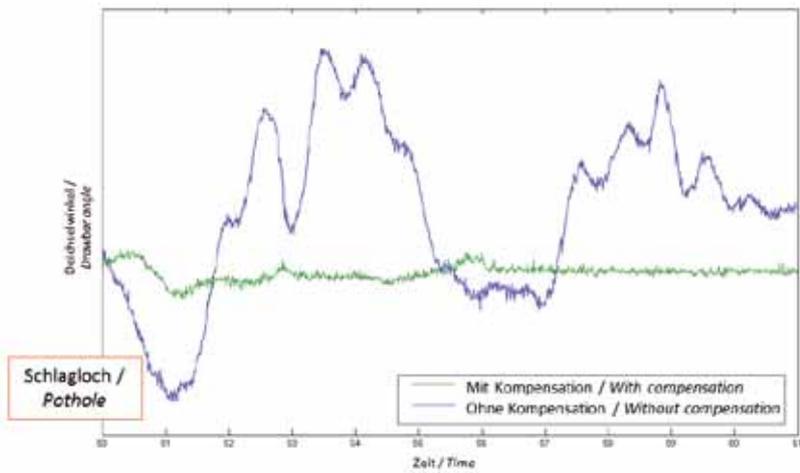
Abb. 3



Messschrieb einer Versuchsfahrt mit Nick- und Wankkompensation [1]

Fig. 3: Measuring track with nodding and rolling compensation [1]

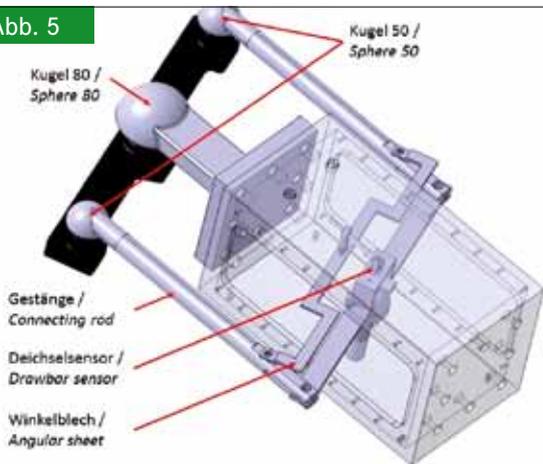
Abb. 4



Vergleich: Mit und ohne Nick- und Wankkompensation [1]

Fig. 4: Comparison: with and without nodding and rolling compensation [1]

Abb. 5



Deichsel sensor [1]

Fig. 5: Drawbar sensor [1]

Abb. 6



Wichtige Entwicklungsschritte der elektrohydraulischen Lenkanlage

Fig. 6: Main sections of the development of the electro-hydraulic steering system

Dazu wird die Deichsel über die normale K80 Kugel mit dem Schlepper verbunden. Anhand eines Gelenkvielecks wird ein Lenktrapez aufgespannt, welches sich auf die genormte K50 Anbindung links und rechts der K80 Kugel sowie einer weiteren K50 Kugel in der Deichselmitte abstützt (**Abbildung 5**). Eine zusätzliche Quertraverse dient als Anlenkpunkt für den Drehwinkelsensor. Der Drehwinkelsensor befindet sich somit immer in der Ebene des Gelenkvielecks wobei die Deichsel des Anhängers frei um die K80 Kugel nicken und wanken kann [1].

Prozess der Serienzulassung

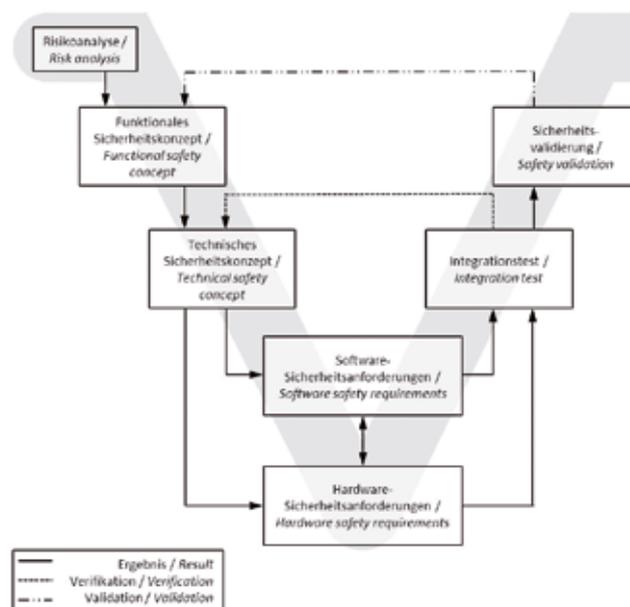
Nach erfolgreicher Funktionsentwicklung und -erprobung stand die Serienzulassung unter Berücksichtigung der funktionalen Sicherheit im Fokus der Entwicklung. Diese wurde in Zusammenarbeit mit dem TÜV Nord Mobilität durchgeführt und mit einer variantenunabhängigen Straßenzulassung gemäß der internationalen Richtlinie für Lenkanlagen (ECE-R 79) im Ja-

nuar 2010 abgeschlossen (**Abbildung 6**). Der Entwicklungsprozess wurde nach ISO 25119 organisiert. Diese Fachgrundnorm für sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen für Traktoren sowie für land- und forstwirtschaftliche Maschinen behandelt den gesamten Sicherheitslebenszyklus von der Idee bis zur Entsorgung des Produktes.

Bereits in der Konzeptphase wurde eine Gefahren- und Risikoanalyse (G & R) durchgeführt, die alle potenziellen Gefahrensituationen aufzeigt und mit strukturierten Bewertungsrichtlinien die gefährlichsten Situationen ermittelt. Letztere sind ausschlaggebend für die Einordnung in den „Agricultural Performance Level“ (AgPL), der Entwicklungsrichtlinien und -prinzipien vorgibt, die das Risiko einer Fehlfunktion auf ein Minimum reduzieren. Die Allradlenkung ist in den Agricultural Performance Level c eingestuft.

Die Norm schreibt eine systematische Arbeitsweise nach dem bekannten V-Modell vor, das in **Abbildung 7** für die Struk-

Abb. 7



Strukturierung von Sicherheitsanforderungen nach [3]

Fig. 7: Structuring of safety requirements according to [3]

turierung der Sicherheitsanforderungen dargestellt ist. Auf der linken Seite des Modells werden methodisch zunächst übergeordnete Anforderungen erarbeitet, bevor diese im technischen Sicherheitskonzept detailliert werden. Beispielhaft ist die Entwicklung des Deichsensors zu nennen. Die funktionale Maßnahme ist in diesem Fall die Sicherstellung der Funktion, folglich die Erfassung des Winkels zwischen Traktor und Anhänger. Die technische Umsetzung konkretisiert die Anforderung und sieht die Einführung eines redundanten Sensors sowie eine Wertebereichsprüfung vor. Des Weiteren werden Ansprechzeiten und das Systemverhalten im Fehlerfall definiert. Diese Anforderungen gelten als Eingangswerte für die ebenfalls nach dem V-Modell entwickelte Hard- und Software. Die einwandfreie Umsetzung der genannten Teilziele wird mit dem Integrationstest und der Sicherheitsvalidierung gewährleistet. Dabei werden die Ziele aus den jeweils gegenüberstehenden Detaillierungsphasen überprüft (**Abbildung 7**).

Die Hardware ist gemäß Kategorie 2 der ISO 25119 aufgebaut, die eine Überwachung der Ein- und Ausgangssignale sowie die Überprüfung der Logikeinheit durch einen zweiten Controller vorschreibt. Alle Einzelkomponenten erfüllen die hohen Ansprüche bezüglich der Ausfallsicherheit (MTTF und B_{10}) und sind hinsichtlich aller im Fahrzeug vorkommenden Umwelteinflüsse, vergleichbar mit den Umweltprüfungen gemäß IEC 60068-2, getestet. Die Prüfung der Systemkomponenten bezüglich der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) erfolgte durch Komponententests nach PREG 95/54/EG bzw. ECE R10-02.

Alle Phasen des Software-Lebenszyklus sind nach dem SRL 1 (software requirement level) entwickelt worden. Zudem wurde eine zertifizierte Programmiersprache und -umgebung verwendet, die nach [4; 5] in das Sicherheits-Integritätslevel 2 (SIL2) eingestuft ist. Kleine und überschaubare Softwaremodule mit minimalen Zugangsrechten zu Daten und definierten Parametern ermöglichten einen strukturierten Softwaremodultest, der unter anderem mit einer Grenzwertanalyse und einem Walkthrough durchgeführt wurde.

Notlauf- und Fehlermanagement

Im Falle einer Störung (z.B. Abriss der hydraulischen oder elektrischen Energie) wurde ein Notlaufsystem entwickelt, welches das elektrohydraulische Lenksystem in ein Nachlaufsystem überführt. Eine über eine Zentriereinheit gesperrte Lenkachse übernimmt dazu die Spurführung. Die anderen Achsen werden zu diesem Zeitpunkt in Schwimmstellung versetzt. Testfahrten mit dem Notlaufsystem im beladenen und ungeladenen Zustand gaben Aufschluss über das Fahrverhalten. Im Fokus standen dabei fahrdynamische Auswirkungen im Übergang von aktiver elektrohydraulischer Lenkung in die passive Nachlauf Lenkung. Für die elektrohydraulische Lenkung ist ein mehrteiliges Fehlermanagement entwickelt worden. Die Zustände wurden entsprechend der Schwere des Fehlers in einen Grün-, Gelb- und Rotstatus klassifiziert und in der Serienbedienung als „Ampeldarstellung“ visualisiert. Hier-

bei stellt der Status Grün den fehlerlosen Zustand des Systems dar. Mittelschwere Fehler z.B. das Überschreiten der zulässigen Höchstgeschwindigkeit im Feldmodus werden als „Gelb“ eingestuft. In diesem Fall wird dann ein Wechsel der aktuellen Lenkstrategie in eine straßenzulässige ausgelöst. Schwere Fehler (Status Rot) führen zur oben beschriebenen Überführung der aktiven elektrohydraulischen Lenkung in die passive Nachlauf Lenkung.

Schlussfolgerungen

Seit 2010 hat das elektrohydraulische Allradlenksystem eine Serienzulassung und darf als erstes System seiner Art im Straßenverkehr geführt werden. Es handelt sich dabei um ein System, welches flexibel auf die Achszahl und auch die Fahrzeuggeometrie (Deichsellänge, Achsabstand, maximaler Lenkachswinkel) eingestellt werden kann. Die Modularität des Systems wird durch eine definierte CAN-Bus-Schnittstelle erhöht.

Literatur

- [1] Bröcker, M.; Johanning, B.; Kotte, S. (2008): Entwicklung einer elektrohydraulischen Lenkung für Flüssigmisttankwagen. Tagung LAND. TECHNIK 2008, VDI-MEG, 25-26.09.2008, Stuttgart-Hohenheim, S. 145-149
- [2] Bröcker, M.; Meyer, J.; Johanning, B. (2009): Strategiewechsel beim Lenken. Mobile Maschinen 2, S. 21-23
- [3] ISO 25119 Teile 1-4 (2010): Tractors and machinery for agriculture and forestry - Safety-related parts of control systems. Berlin, Beuth Verlag
- [4] DIN EN 61508 Teile 1-7 (1999-2000): Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/elektronischer/programmierbarer elektronischer Systeme. Berlin, Beuth Verlag
- [5] DIN EN 61511 Teile 1-3 (2003-2004): Funktionale Sicherheit - Sicherheitstechnische Systeme für die Prozessindustrie. Berlin, Beuth Verlag

Autoren

Christoph Dillmann, M. Sc., Dipl.-Ing. (FH) Michael Kreyenhagen, M. Sc. und Dipl.-Ing. (FH) Jens Meyer, M. Sc. sind wissenschaftlicher Mitarbeiter im Labor für Landtechnik und mobile Arbeitsmaschinen an der Hochschule Osnabrück, Fakultät Ingenieurwissenschaften und Informatik, E-Mail: C.Dillmann@hs-osnabrueck.de, M.Kreyenhagen@hs-osnabrueck.de, Jens.Meyer@hs-osnabrueck.de

Prof. Dr.-Ing. Bernd Johanning leitet das Labor für Landtechnik und mobile Arbeitsmaschinen an der Hochschule Osnabrück, Fakultät Ingenieurwissenschaften und Informatik, E-Mail: B.Johanning@hs-osnabrueck.de