

# Steer-by-wire-Lenkung mit erweiterter Funktionalität für heckgelenkte Fahrzeuge

Christoph Dillmann, Bernd Johanning

Heckgelenkte selbstfahrende Erntemaschinen sind die zentralen Elemente moderner Ernteketten in der Landwirtschaft. Das primär auf Bodenschonung ausgelegte Fahrwerk, die aktuelle Höchstgeschwindigkeit von 40 km/h sowie die systembedingten, fahrdynamischen Nachteile einer heckgelenkten Maschine erschweren jedoch die Fahrzeugführung auf der Straße. Das Spurhalten und Stabilisieren erfordert daher viel Erfahrung und eine hohe Konzentration des Fahrers. Fahrdynamiksysteme können den Fahrzeugführer entlasten und somit das Fahren mit hohen Geschwindigkeiten sicherer und komfortabler gestalten. Im hier vorgestellten Projekt wird in diesem Kontext eine Steer-by-wire-Lenkung mit parametrierbarer Lenkcharakteristik vorgestellt, die auf die unterschiedlichen Vorzüge des Fahrers einstellbar ist und fahrzustandsabhängige Informationen über das Lenkrad an den Bediener übermittelt.

## Schlüsselwörter

Lenksystem, Steer-by-Wire, Hinterradlenkung, Fahrsicherheit, mobile Arbeitsmaschinen

Heckgelenkte selbstfahrende Erntemaschinen, wie z.B. Feldhäcksler, sind die zentralen Elemente moderner Ernteketten in der Landwirtschaft. Um die Wirtschaftlichkeit solcher Maschinen zu gewährleisten, ist ein schnelles Umsetzen zwischen den einzelnen Schlägen notwendig. Dies führte zu einer herstellerübergreifenden Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit von ehemals 25 km/h auf aktuell 40 km/h, wodurch die Fahrdynamik und die Fahrsicherheit mobiler Arbeitsmaschinen immer mehr an Bedeutung gewinnt. In diesem Kontext sind folgende systembedingte Nachteile heckgelenkter Maschinen zu nennen:

- Negativer Eigenlenkgradient
- Fehlende Lenkrückstellkräfte
- Entkopplung zwischen Fahrer und Fahrzeug

Das Eigenlenkverhalten eines Fahrzeugs wird nach DIN 70000 mathematisch durch den Eigenlenkgradient (EG) beschrieben:

$$EG = \frac{d\delta_H}{da_y} \cdot \frac{1}{i_s} - \frac{d\delta_A}{da_y} \quad (\text{Gl. 1})$$

In Fahrversuchen wird der EG häufig in stationären Kreisfahrten mit konstantem Radius ermittelt, da in diesem Fall der Ackermannwinkel  $\delta_A$  konstant und damit die Ableitung nach der Querbeschleunigung  $a_y$  gleich Null ist. Bei konstanter Lenkübersetzung  $i_s$  kann der EG daher direkt aus der Lenkradwinkelbedarfskurve abgelesen werden (Abbildung 1). Bei einem Fahrzeug mit negativen Eigenlenkgradienten und dem damit verbundenen übersteuernden Fahrverhalten muss mit steigender Querbeschleunigung der Lenkradwinkel  $\delta_H$  immer weiter zurückgenommen werden. Wird der

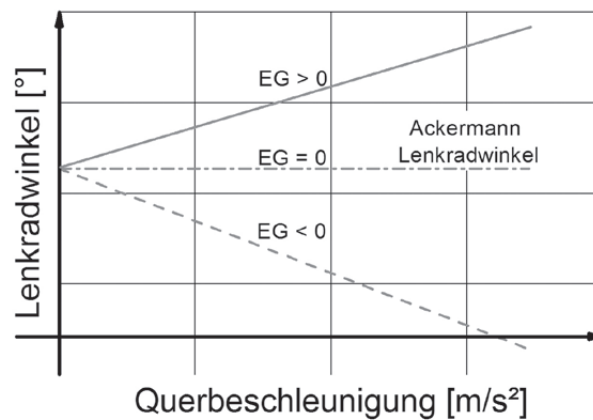


Abbildung 1: Lenkradwinkelbedarf bei konstantem Radius nach SCHINDLER (2007)

Lenkradwinkel auf Null reduziert wird, ist die Stabilitätsgrenze erreicht. Darüber hinaus wird das Fahrzeug instabil. Demnach sind heckgelenkte Maschinen nur bis zu einer fahrzeugspezifischen, kritischen Fahrgeschwindigkeit sicher zu führen (HEROLD und WALLBRECHER 2013).

Ein weiterer Nachteil von heckgelenkten Fahrzeugen sind die negativen Rückstellmomente  $M_{SR}$  an den gelenkten Hinterrädern. Hervorgerufen werden sie durch die Seitenführungskräfte  $F_S$ , die aus der Reifenlatschmitte versetzt um den Reifennachlauf  $n_R$  angreifen (Abbildung 2). Dies führt zu einer selbstständigen Vergrößerung des Lenkeinschlags und nicht wie bei einem Frontlenker zu einem selbstständigen Rückstellen in die Mittellage. Ein großer Vorlaufwinkel sowie eine große Spreizung an der Hinterachse erhöhen zwar die Fahrsicherheit durch Kompensation dieser Eigenschaft, vergrößern dabei aber auch das Stabilitätsproblem bei erhöhten Fahrgeschwindigkeiten (ZOMOTOR 1987).

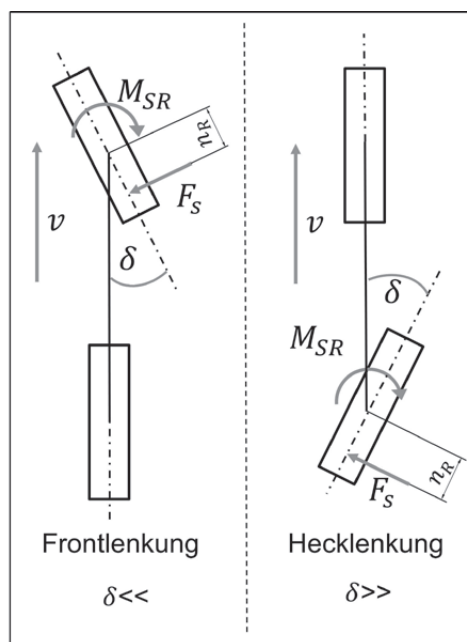


Abbildung 2: Rückstellmoment bei Front- und Hecklenkung

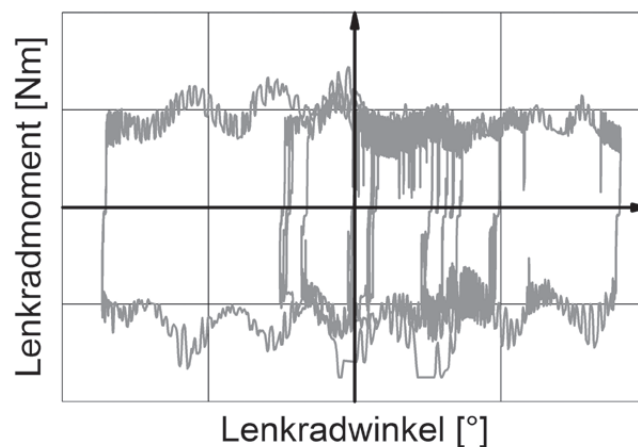


Abbildung 3: Lenkradmomentenverlauf einer Orbitrollenkung

Um der eigenständigen Vergrößerung des Lenkwinkels entgegenzuwirken, werden bei mobilen Arbeitsmaschinen hydrostatische Lenksysteme eingesetzt, die bei konstantem Lenkradwinkel den Lenkzylinder hydraulisch einspannen. Dies führt jedoch zu einer starken Entkopplung zwischen Fahrer und Fahrzeug ohne Rückmeldung des fahrdynamischen Zustands. In Abbildung 3 ist der Verlauf des Lenkradmoments über den Lenkradwinkel bei konstanter Fahrgeschwindigkeit dargestellt. Über den gesamten Lenkwinkelbereich, und somit bei verschiedenen Querschleunigungen, ist das Lenkradmoment annähernd konstant. Das haptische Feedback der Lenkung übermittelt dem Fahrer somit keine Information über den fahrdynamischen Zustand der Maschine.

Aus den vorgestellten Nachteilen leitet sich somit das Forschungsziel, die Verbesserung der Querdynamik von schnellfahrenden, heckgelenkten Arbeitsmaschinen, des vom BMBF geförderten Projektes ab. Hierzu sollen am Beispiel eines Feldhäckslers aktive Fahrdynamiksysteme entwickelt werden, die das sichere Fahren bei Geschwindigkeiten von 40 km/h und mehr ermöglichen.

### Lösungskonzepte

Als Lösungsansätze kommen sowohl die fahrmechanische Veränderung der Querdynamik als auch die Verbesserung der Wahrnehmung des Fahrers auf Lenkreaktionen, die unter anderem vom haptischen Feedback der Lenkung abhängig ist, in Betracht (SCHMIDTKE 1993). In Bezug auf die oben genannten Nachteile ergeben sich folgende Lösungskonzepte:

1. Geregelter Drehzahldifferenz an den Vorderrädern (Skid-Steer-Prinzip), die für kleine Lenkbewegungen autark oder aber zur Unterstützung der Hinterradlenkung eingesetzt werden kann. Eine derartige Funktion kann entweder über die Regelung der hydraulischen Verstellereinheiten (Hydromotoren) oder durch unmittelbares Anbremsen eines Vorderrades realisiert werden.
2. Lenkeinschlag der Vorderräder mit kleinen Lenkwinkeln und gleichen Einflussmöglichkeiten auf die Fahrdynamik wie unter Punkt 1.
3. Aktive Fahrersitzverstellung (Drehwinkel um die Hochachse bzw. Querneigung) als Feedback bzw. zur Verstärkung der Wahrnehmung über die aktuelle Fahrzeugsituation bzw. -reaktion. Eine Fortsetzung dieses Ansatzes könnte in einer aktiven Bewegung der gesamten Kabine kulminieren.
4. Elektrohydraulische Lenkung mit der Zusatzfunktionalität einer geschwindigkeits- und lenkwinkelabhängigen Lenkübersetzung bzw. eines Lenkradmoments.

5. Aktiv geregelte Lenkrückstellkräfte zur Realisierung einer selbsttätigen Geradeaus-Lenktenz sowie Lenkungsrückstellung nach einer Kurvenfahrt. Dieser Lösungsansatz zielt auf die haptische Wahrnehmung des Fahrers ab und sorgt für eine Verbesserung des Lenkgefühls bei hohen Fahrgeschwindigkeiten.

Die genannten Konzepte erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit und werden im Forschungsvorhaben ergebnisoffen diskutiert. In diesem Beitrag werden erste Erkenntnisse zu den Konzepten 4 und 5 vorgestellt, die durch die Integration einer neuen Lenkassistentenfunktion zu einer verbesserten Wahrnehmung des Fahrers führen.

### Versuchsfahrzeug

Der Versuchsträger, ein Feldhäcksler BiG X V8 der Fa. Krone, ist um eine Steer-by-wire-Lenkung (SbW-Lenkung) erweitert worden. Hauptkomponenten der SbW-Lenkung (Abbildung 4) sind ein Proportionalventil und der sogenannte Lenksimulator, bestehend aus Absolutdrehgeber, elektromagnetischer Bremse, einem Getriebe sowie einem Motor mit entsprechender Motorelektronik. Der Ist-Winkel der Lenkachse wird mit einem Winkelsensor aufgenommen und wie die übrigen Signale mit einem Rapid-Control-Prototyping-System (RCP-System) verarbeitet. Zudem wurde ein 3/2-Wegeventil zum Umschalten zwischen SbW- und Orbitrollenkung eingebaut, wodurch ein schnelles Wechseln zwischen den beiden Lenkungsarten auf hydraulischer Ebene gewährleistet ist. Der Lenksimulator ist an der Lenksäule des Feldhäckslers montiert und kann durch Umstecken des Lenkrads in Betrieb genommen werden. Ein direkter Vergleich der beiden Systeme ist somit ohne aufwendige Rüstzeiten möglich.

Neben den genannten Komponenten zur Funktionsherstellung ist weitere Messtechnik installiert. Ein Inertialmesssystem misst die fahrdynamischen Parameter, wie z. B. die Geschwindigkeit, Nick-, Wank- und Gierwinkel sowie die Beschleunigungen im Schwerpunkt der Maschine. Ein Lenkradsensor erfasst Lenkradmoment, -winkel, -geschwindigkeit und -beschleunigung.

Mit der SbW-Lenkung können synthetische Momente am Lenkrad generiert werden. Unterschiedliche Sensorsignale, wie z. B. der Lenkradwinkel oder die Quereschleunigung, können als Eingangsgröße den Verlauf sowie die Amplitude des Lenkradmoments und die Lenkübersetzung charakterisieren. Die Modellierung fahrsituationspezifischer Lenkradmomente und Lenkrückstellkräfte zur aktiven Mittenstellung nach einer Kurvenfahrt oder zur Herstellung einer Geradeaus-Laufteizenz (Grabeneffekt) sind möglich. Mit dem Versuchsfahrzeug können somit verschiedene Lösungskonzepte zur Wahrnehmung des Fahrers erprobt werden.

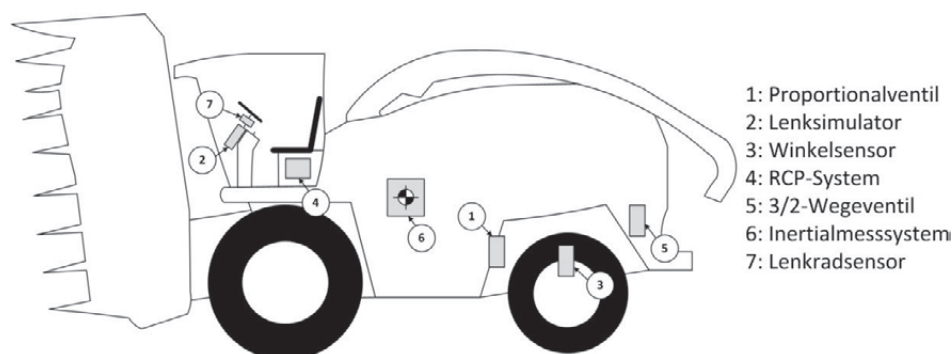


Abbildung 4: Schematische Anordnung der Komponenten im Versuchsträger

## Versuchsziele und -durchführung

Ziel der Versuche ist die Ermittlung von Parameterkombinationen, die dem Fahrer ein positives Lenkgefühl in der jeweiligen Fahrsituation vermitteln. Nach WOLF (2008) kann das Lenkgefühl in einen engeren und einen weiteren Sinn unterteilt werden. In den Fahrversuchen wird das Lenkgefühl im engeren Sinn betrachtet, welches vorwiegend das Lenkradmoment sowie den Lenkradwinkel beinhaltet und somit auf die haptische Sinneswahrnehmung am Lenkrad abzielt. Die Bewertung des Lenksystems findet daher subjektiv statt, was auch heute, trotz verschiedener Ansätze zur Objektivierung des Lenkgefühls, immer noch das beste Werkzeug zur Bewertung des Lenk- und Fahrverhaltens darstellt (KOCH 2010).

Die Versuchsfahrten werden von Normalfahrern durchgeführt, die im Gegensatz zu ausgebildeten Testfahrern weder subjektive Bewertungen der Lenkcharakteristik reproduzieren noch mehrere Varianten miteinander vergleichen können (BARTHENHEIER 2006). Daher wird bei der Variation der einzelnen Parameter eine relative Bewertung zwischen zwei Paaren durchgeführt. Die Probanden werden in Versuchsszenarien typischen Fahrsituationen ausgesetzt, die sie nach bestimmten Kriterien beurteilen müssen. Für das Szenario Parkieren werden z. B. folgende Eigenschaften im Hinblick auf Fahrkomfort, Fahrsicherheit und der Rückmeldung des fahrdynamischen Zustands bewertet:

- Anlenkmoment
- Lenkradmomentenverlauf
- Lenkwinkelbedarf

Aus dem Automobilbereich sind bevorzugte Ausprägungen sowie Grenzen der genannten Parameter bekannt (WOLF 2008, HEISSING und BRANDL 2002) und es liegen Simulationen zur Abbildung des Fahrerverhaltens vor, bei denen Parameter des Fahrermodells in Korrelation zu Subjektivurteilen von Fahrern gebracht werden (HENZE 2004, ZSCHOCKE 2009). Die Erkenntnisse können jedoch schon aufgrund verschiedener Lenkungskonzepte und Geschwindigkeitsbereiche nicht direkt für heckgelenkte mobile Arbeitsmaschinen übernommen werden. Daher wurden im Vorfeld Parameterstudien durchgeführt, um sinnvolle Kombinationen von Lenkübersetzung, Lenkradmoment und Lenkradrückstellung zu identifizieren und somit die Variantenvielfalt einzugrenzen, sodass eine Überprüfung durch Normalfahrer realisierbar ist.

In Abbildung 5 sind zwei Lenkradmomentenverläufe für verschiedene Geschwindigkeiten exemplarisch dargestellt. Das Moment steigt beim Einlenken in eine Kurve bis zum Endanschlag an. Beim Auslenken aus der Kurve heraus herrscht ein kleines, konstantes Gegenmoment bis zur Nulllage, die beidseitig von einem steil ansteigenden Moment geprägt ist. Bei Geschwindigkeit 2 wurde der Endanschlag nicht erreicht.

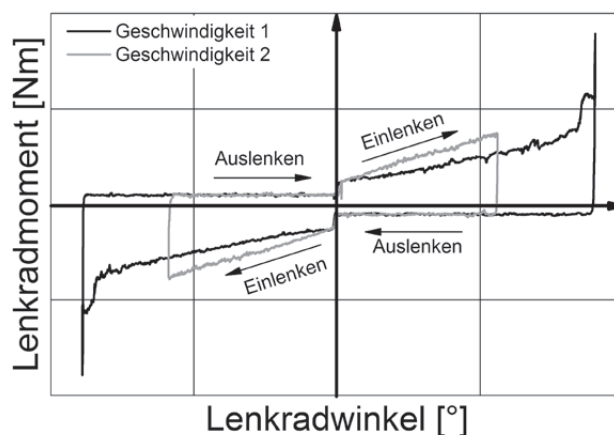


Abbildung 5: Verlauf des Lenkradmoments der SbW-Lenkung

## Schlussfolgerungen

Die systembedingten Nachteile einer hinterradgelenkten Arbeitsmaschine mit Orbitrollenkung erfordern viel Geschick und Erfahrung beim Führen solcher Maschinen. Die Integration einer SbW-Lenkung mit den oben genannten Zusatzfunktionalitäten weist ein großes Potenzial auf, um die Wahrnehmung des Fahrzeugführers zu verbessern. Einer kleine Probandengruppe konnte in Versuchen bereits ein verbessertes Lenkgefühl durch die Implementierung der aktiven Mittenstellung und des ausgeprägten Moments um die Nulllage identifizieren. Dies gilt es in weiteren Versuchsreihen zu bestätigen und unter den oben genannten Kriterien eine fahrerspezifische Lenkradmomentencharakteristik zu ermitteln.

Das hier präsentierte Konzept beschränkt sich auf die Straßenfahrt. Sicherheitstechnische Aspekte und Lenkradmomente beim Arbeitsprozess, bei dem andere Kriterien gelten, werden zunächst nicht berücksichtigt. Im Hinblick auf eine spätere Serienzulassung und eine optimale Auslegung des Gesamtsystems sind weitere Untersuchungen notwendig.

## Literatur

- Barthenheier, T. (2006): Potential einer individuellen Lenkradmomentengestaltung. In: Subjektive Fahreindrücke sichtbar machen III, Hg. Brill, U.; Becker, K., Renningen, Expert Verlag, S. 50–73
- Heißing, B.; Brandl, H.J. (2002): Subjektive Beurteilung des Fahrverhaltens. Würzburg, Vogel Verlag
- Henze, R. (2004): Beurteilung von Fahrzeugen mit Hilfe eines Fahrermodells. Dissertation, Technische Universität Braunschweig
- Herold, P.; Wallbrecher, M. (2013): Allradlenkung. In: Lenkungshandbuch: Lenksysteme, Lenkgefühl, Fahrdynamik von Kraftfahrzeugen, Hg. Pfeffer, P.; Harrer, M., Wiesbaden, Springer Vieweg Verlag, 2. Aufl., S. 431–446
- Koch, T. (2010): Untersuchungen zum Lenkgefühl von Steer-by-Wire Lenksystemen. Dissertation, Technische Universität München
- Schindler, E. (2007): Fahrdynamik: Grundlagen des Lenkverhaltens und ihre Anwendung für Fahrzeugregelsysteme. Renningen, Expert Verlag
- Schmidtke, H. (1993): Ergonomie. München, Hanser Verlag, 3. Aufl.
- Wolf, H. J. (2008): Ergonomische Untersuchungen des Lenkgefühls an Personenkraftwagen. Dissertation, Technische Universität München

Zomotor, A. (1987): Fahrwerktechnik: Fahrverhalten. Würzburg, Vogel Verlag

Zschocke, A. K. (2009): Ein Beitrag zur objektiven und subjektiven Evaluierung des Lenkkomforts von Kraftfahrzeugen. Dissertation, Universität Karlsruhe

## Autoren

**Christoph Dillmann, M. Sc.** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter und **Prof. Dr.-Ing. Bernd Johanning** leitet das Labor für Landtechnik und mobile Arbeitsmaschinen an der Hochschule Osnabrück, Fakultät Ingenieurwissenschaften und Informatik Artilleriestr. 44, 49076 Osnabrück, E-Mail: c.dillmann@hs-osnabrueck.de

## Hinweise

Wir bedanken uns bei dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die finanzielle Förderung des Forschungsprojektes Aktive Fahrdynamiksysteme für schnellfahrende, mobile Arbeitsmaschinen mit Hinterradlenkung (FASMOBA).

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. 191-196).