

Nutzen automatischer Lenksysteme

Arbeitswirtschaftliche und ergonomische Aspekte | Technik im Überblick

Oktober 2012

Autorinnen und Autoren

Martin Holpp, Thomas Anken,
Monika Sauter, ART

Milan Kroulík, Zdeněk Kvíz Tschechische Universität für Lebenswissenschaften, Prag

Oliver Hensel, Universität Kassel,
Agrartechnik Witzenhausen

martin.holpp@art.admin.ch

Impressum

Herausgeber:
Forschungsanstalt Agroscope
Reckenholz-Tänikon ART
Tänikon, CH-8356 Ettenhausen,
Redaktion: Etel Keller, ART

Die ART-Berichte/Rapports ART erscheinen in rund 20 Nummern pro Jahr. Jahresabonnement Fr. 60.–. Bestellung von Abonnements und Einzelnummern: ART, Bibliothek, 8356 Ettenhausen
T +41 (0)52 368 31 31
F +41 (0)52 365 11 90
doku@art.admin.ch
Downloads: www.agroscope.ch

ISSN 1661-7568



Agroscope untersuchte den arbeitswirtschaftlichen und ergonomischen Nutzen präziser automatischer Lenksysteme. (Foto: M. Kroulík)

Satellitenbasierte automatische Lenksysteme sollen eine hohe Lenkgenauigkeit einhalten und die Fahrerin oder den Fahrer entlasten. Doch lassen sich diese arbeitswirtschaftlichen und ergonomischen Auswirkungen für die Praxis beziffern?

Die Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART klärte diese Fragen in Zusammenarbeit mit der Tschechischen Universität für Lebenswissenschaften in Prag sowie der Universität Kassel, Agrartechnik Witzenhausen, in einem gross angelegten Feldversuch unter Praxisbedingungen. 17 Fahrer wurden während der Grundbodenbearbeitung, der Saattbettbereitung und der Aussaat mit und ohne automatisches Lenksystem beobachtet und ausgewertet. Die Arbeitsbreiten lagen zwischen 5 und 15 m, die Schlaggrößen zwischen 1,2 und 15,7 ha. Die Lenksysteme hatten mit einer Präzision von $\pm 2,5$ cm die höchste Genauigkeitsklasse. Die Ergebnisse zeigten, dass Fahrgeschwindigkeiten, Wendezeiten und Arbeitsbrei-

tenausnutzung mit Lenksystem zum Teil leicht vorteilhafter waren, sich aber nicht signifikant unterschieden. Die durch Fahrer, Feldform und Feldränder verursachten Abweichungen hatten einen grösseren Einfluss auf die Werte als die Nutzung von Lenksystemen.

Zwei Messwerte unterschieden sich hingegen signifikant: Zum einen erhöhte sich mit dem Lenksystem wie erwartet die Lenkgenauigkeit. Der Effekt war mit grossen Arbeitsbreiten ohne Spuranreisser wesentlich stärker ausgeprägt als bei der Saat mit geringeren Arbeitsbreiten und Spuranreissern. Zudem führten Lenksysteme zu einer Entlastung des Fahrers. Beim Fahren mit Lenksystem war die Herzfrequenz als Mass der Belastung immer tiefer.

Zusammengefasst steigern Lenksysteme den Komfort und die Ergonomie von Traktorarbeitsplätzen. Die Fahrer bleiben länger leistungsfähig und die Arbeitsqualität bleibt auf einem konstant hohen Niveau.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches
Volkswirtschaftsdepartement EVD
Forschungsanstalt
Agroscope Reckenholz-Tänikon ART

Problemstellung / Methodik

Satellitenbasierte automatische Lenksysteme beeinflussen arbeitswirtschaftliche und ergonomische Parameter. In der Literatur finden sich einige Untersuchungen zu Arbeitsbreitenausnutzung, Wendezeitbedarf und Lenkgenauigkeit, die aber meist unter experimentellen Bedingungen stattfanden. Hinsichtlich der stets erwähnten Verminderung der Fahrerbelastung fanden sich keine Informationen. Zur erweiterten Abklärung arbeitswirtschaftlicher und ergonomischer Effekte automatischer Lenksysteme führte ART gemeinsam mit Partnern einen Feldversuch unter Praxisbedingungen durch.

Bei derartigen Messungen hat der Fahrer einen grossen Einfluss auf die Ergebnisse. Für eine aussagekräftige Erhebung mussten die Messungen mit einer ausreichenden Anzahl an Fahrern wiederholt werden. Da vor Ort in Tänikon und auch im weiteren Umkreis weder genügend Fahrer noch Flächen zur Verfügung standen, wurden die Untersuchungen an der Agrartechnischen Fakultät der Tschechischen Universität für Lebenswissenschaften in Prag durchgeführt.

Die Erhebungen mit 17 professionellen Fahrern bei den Arbeitsgängen Grundbodenbearbeitung, Saatbettbereitung und Aussaat fanden im Herbst 2010 und Frühjahr 2011 in verschiedenen tschechischen Regionen statt. Da Lenksysteme im Ackerbau und auf Grünland in der Regel erst bei Arbeitsbreiten über 3 m einen Vorteil bringen (ART-Bericht 659), kamen in der Untersuchung grössere Arbeitsbreiten von 5 bis 15 m zum Einsatz. Diese Masse finden sich in der Grünlandbewirtschaftung, bei Düngung und Pflanzenschutz sowie im Lohnunternehmereinsatz. Die 66 Versuchspartellen hatten eine Fläche von 1,2 bis 15,7 ha (Ø 5,7 ha). Es wurden einheitlich Trimble EZG-500-Lenksysteme mit einer Genauigkeit von $\pm 2,5$ cm genutzt. Mit einer Ausnahme (Lenkradmotor) steuerten sie direkt die Lenkhydraulik an. Das Messverhältnis der Fahrzeit ohne/mit Lenksystem war etwa 1:1. Die Fahrer fuhren in der Regel wechselweise zwei Partellen ohne und zwei Partellen mit Lenksystem. Basierend auf den Positions- und Herzfrequenzdaten (Polar-Sportuhr) wurden die **Fahrgeschwindigkeiten** im Feld und **Vorgewende**, **Wendezeiten**, **Ausnutzung der Arbeitsbreiten**, **Lenkgenauigkeit** sowie **Herzfrequenz** im Feld und Vorgewende bestimmt.

Durch die Nutzung betriebseigener Lenksysteme und mit dem Umgang vertrauten Fahrern konnten lernbedingte Effekte ausgeschlossen werden. Zur Vermeidung von Stör-

einflüssen befand sich während der Messung ausser dem Fahrer niemand auf dem Traktor. Die Messungen fanden über den Tag verteilt von 07:00 bis 00:00 Uhr statt. Es wurde keine automatische Geschwindigkeitsregelung (Tempomat) benutzt. Mit einer Ausnahme wurde auf allen Feldern in geraden Linien parallel gefahren, auf einem wurde in Konturfahrt entlang der geschwungenen Vorgängerspurs gearbeitet. Die Fahrer wählten den Wendemodus entsprechend den Bedingungen vor Ort. Ohne Lenksystem wurde immer in Omegakurven, mit Lenksystem in Omegakurven oder mit dem Überspringen von Spuren gewendet. Die bei kleineren Arbeitsbreiten bzw. bei kurzem Vorgewende häufig verwendete Schwalbenschwanzwende wurde im Versuch nie gefahren (Abb. 1). Eine statistische Auswertung der Messungen liess sich über die Mittelwerte aller Arbeitsgänge vornehmen. Eine Differenzierung nach Arbeitsgängen war aufgrund des zu geringen Stichprobenumfangs nicht möglich.

Ergebnisse

Die von 14 Fahrern ausgewerteten **Fahrgeschwindigkeiten** zeigten keine statistisch signifikanten Unterschiede. Sowohl im Vorgewende als auch im Feld waren die Fahrgeschwindigkeiten mit und ohne Lenksystem nahezu identisch. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass unabhängig vom Einsatz des Lenksystems stets versucht wurde, mit der für den jeweiligen Arbeitsgang maximal möglichen Geschwindigkeit zu fahren. Die Kontrolle der Anschlussgenauigkeit im Feld wirkte nicht limitierend. Für die Berechnung der **Wendezeiten** dienten 350 Wendevorgänge von sechs Fahrern. Die mittlere Wendezeit lag ohne Lenksystem bei 30s, mit Lenksystem bei 29s. Die Unterschiede waren statistisch nicht signifikant. Dieser Effekt liess sich darauf zurückführen, dass beim Fahren mit Lenksystem zwecks Anpassung an die naturräumlichen Bedingungen zum Teil im selben Feld sowohl in Omegakurven als auch mit Überspringen der Spur gewendet wurde. Diese beiden Wendemodi unterscheiden sich im Zeitbedarf nur gering voneinander. Tschechische Messungen mit einer Wendezeiteinsparung von etwa 5% bestätigen die Ergebnisse. Der Einspareffekt bei Beibehalten derselben Wendeform ist nur gering. Relevante Unterschiede zeigen sich, wenn die zeitintensive Schwalbenschwanzwende durch ein zeitsparendes Überspringen von Fahrspuren ersetzt werden kann.

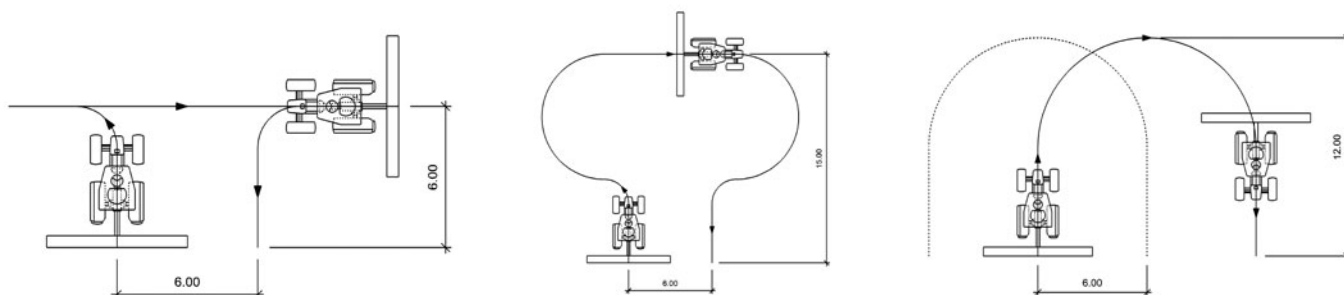


Abb. 1: Links Wenden in Schwalbenschwanzform, Mitte Wenden in Omegaform jeweils mit direktem Anschluss an die letzte Fahrspur. Rechts Wenden mit Überspringen einer Fahrspur. Fahrzeug- und Spurmasse beispielhaft. Quelle: Agroscope

Mit einem solchen Wechsel der Wendeform liessen sich in bayerischen Versuchen beim Säen und Hacken von Zuckerrüben Einsparungen in der Grössenordnung von 35 % bzw. 8 Sekunden realisieren. Österreichische Versuche beim Grubbern berichten von 15 % Zeitersparnis beim Wenden.

Die **Ausnutzung der Gerätearbeitsbreite** auf Basis der Daten von sechs Fahrern war beide Male sehr hoch. Ohne Lenksystem fuhren sie mit einer leichten Überlappung von 1 % der Arbeitsbreite, mit Lenksystem nur mit 0,2 %. Bei einer mittleren Gerätearbeitsbreite von 8,5m nutzten sie mit dem Lenksystem gut 4 cm mehr aus als ohne Lenksystem. Die Unterschiede waren aber statistisch nicht signifikant. Die hohe Ausnutzung der Arbeitsbreite auch ohne Lenksystem dürfte darauf zurückzuführen sein, dass mit professionellen Fahrern auf grossflächigen Betrieben gearbeitet wurde, die auch bei manuellem Lenken eine sehr hohe Arbeitsbreitenausnutzung erzielen. Dies erklärt auch, weshalb die gemessenen Werte geringer als in deutschen Versuchen mit einer um 6 bis 15 cm verbesserten Ausnutzung waren.

Zur Analyse der **Lenkgenauigkeit** dienten 201 Fahrspuren in der Hauptfläche von fünf Fahrern im Frühjahr 2011. Bei Grundbodenbearbeitung und Saatbettbereitung fuhren die Fahrer mit Lenksystem genauer als ohne. Der Genauigkeitsgewinn stieg mit wachsender Arbeitsbreite. Bei der Aussaat ohne Lenksystem fuhren die beiden Fahrer mit Spuranreissern ähnlich genau wie mit Lenksystem bzw. in einem ähnlichen Genauigkeitsbereich wie die Fahrer bei Grundbodenbearbeitung und Saatbettbereitung mit Lenksystem. Abb. 2 zeigt die Abweichung der Positionspunkte von der Sollfahrspur (dicke schwarze Nulllinie). Ohne Lenksystem lag die Abweichung in 50 % der Fälle in einem Bereich von ± 20 cm, die Maximalwerte lagen bei ± 75 cm. Mit Lenksystem lag die Abweichung in 50 % der Fälle in einem Bereich von ± 7 cm, die Maximalwerte lagen

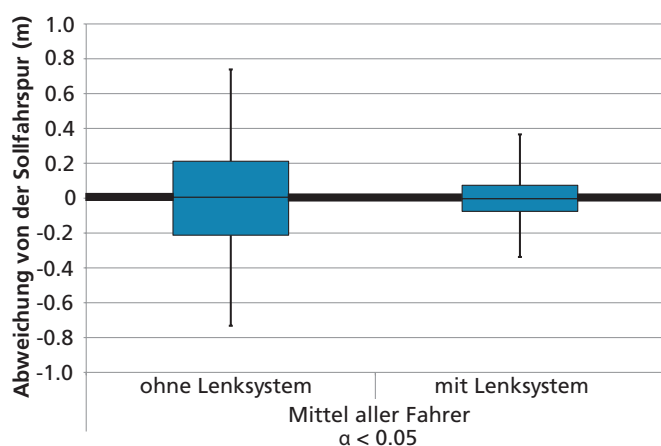


Abb. 2: Die Lenkgenauigkeit beim Fahren ohne und mit Lenksystem unterscheidet sich signifikant: Das Diagramm zeigt die Abweichung der Positionspunkte von der Sollfahrspur (dicke schwarze Nulllinie). Ohne Lenksysteme lag die Abweichung in 50 % der Fälle in einem Bereich von ± 20 cm, die Maximalwerte lagen bei ± 75 cm. Mit Lenksystem lag die Abweichung in 50 % der Fälle in einem Bereich von ± 7 cm, die Maximalwerte lagen bei ± 38 cm.

bei ± 38 cm. Die Unterschiede waren signifikant. Wie erwartet und von anderen Versuchen bestätigt, erreichten die Fahrer mit Lenksystemen höhere Genauigkeiten als ohne. Bei der ohne Spuranreisser durchgeführten Grundbodenbearbeitung und Saatbettbereitung war der Effekt stark ausgeprägt, bei der Saat mit Spuranreissern nur schwach. Es scheint plausibel, dass mit Spuranreissern in einem ähnlichen Genauigkeitsbereich wie mit Lenksystem gefahren werden kann. Voraussetzung dafür sind gut sichtbare Markierungen, wie es im vorliegenden Fall bei der Saat nach einer Saatbettbereitung der Fall war.

Die **Herzfrequenz** lag im Mittel der 14 ausgewerteten Fahrer in der Hauptfläche bei 84 Schlägen/min, im Vorgewende bei 86 Schlägen/min. Es liess sich keine Tendenz zu einer Abhängigkeit von den Arbeitsgängen erkennen. Mit Lenksystem sank die Herzfrequenz im Mittel sowohl in der Hauptfläche als auch im Vorgewende um 2 Schläge/min. Die Entlastung im Vorgewende war mit 2,5 % etwas höher als in der Hauptfläche mit 1,5 % (Abb. 3). Die Unterschiede waren stets signifikant. Diese durchschnittliche Reduktion der Herzfrequenz beim Fahren mit Lenksystem liegt in einem ähnlichen Bereich wie die Herzfrequenzänderungen bei der Anpassung an einfache Situationsänderungen im Strassenverkehr wie Spurwechsel, Überholen oder Abbiegen. Die gemessenen Unterschiede scheinen gering, es ist aber zu berücksichtigen, dass Lenksysteme das Ausmass der körperlichen Anstrengung kaum verändern und die Herzfrequenz primär die mentale Belastungsänderung indiziert. 2 Schläge/min entsprechen dem beim Fahren sowohl mit als auch ohne Lenksystem gemessenen Herzfrequenzunterschied zwischen Fahren in der Hauptfläche und im Vorgewende. Somit reduzieren Lenksysteme die Belastung in einem Umfang, der mit dem Belastungsunterschied zwischen Vorgewende und Hauptfläche verglichen werden kann. Diese Belastungsabnahme wird von Fahrern positiv gewertet.

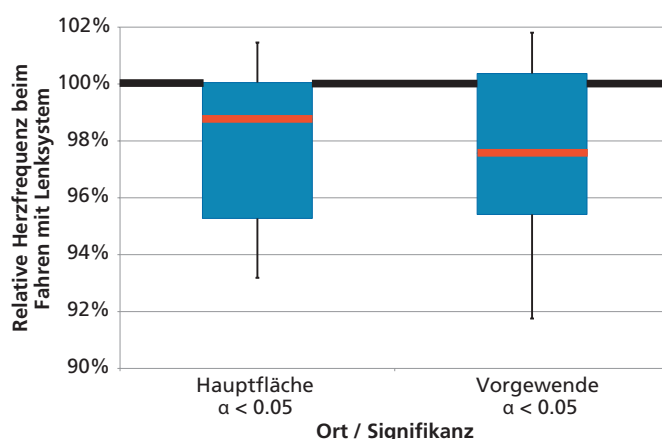


Abb. 3: Die Herzfrequenz beim Fahren ohne und mit Lenksystem unterscheidet sich signifikant: Das Diagramm zeigt die Herzfrequenz beim Fahren mit Lenksystem in Relation zum Fahren ohne Lenksystem (=100 %). Mit Lenksystem sank die Herzfrequenz in der Hauptfläche auf 98,5 % und im Vorgewende auf 97,5 % (=roter Balken in blauer Box). In beiden Fällen entspricht dies einer Reduktion um 2 Schläge/min. Lenksysteme reduzieren die Belastung also in einem Umfang, der mit dem Belastungsunterschied zwischen Vorgewende und Hauptfläche verglichen werden kann.

Schlussfolgerung

In der vorliegenden Untersuchung mit 17 Fahrern wurden bei den Arbeitsgängen Grundbodenbearbeitung, Saatbettbereitung und Aussaat meist nur geringe Auswirkungen von Lenksystemen gemessen. Fahrgeschwindigkeiten im Vorgehende und in der Hauptfläche, Wendezeiten und Ausnutzung der Gerätearbeitsbreiten waren mit Lenksystem zum Teil leicht vorteilhafter als ohne, unterschieden sich aber nicht signifikant voneinander. Arbeitsbreiten, Fahrer und naturräumliche Gegebenheiten wie die Schlagform und die sich daraus ergebenden optimalen Wendestrategien hatten im Praxisversuch einen wesentlich grösseren Einfluss auf die Messparameter als der Einsatz des Lenksystems selbst.

Für eine Optimierung des Wendezeitbedarfs ist ein Wechsel des Wendemodus wichtig: Weg von der Schwalbenschwanzwende, hin zur Omegakurve bzw. dem Überspringen einer Spur. Hierfür ist nicht unbedingt ein Lenksystem erforderlich. Traktoren mit grossen Lenkwinkelschlägen für eine platzsparende Omegakurve können einen ähnlichen Effekt bringen. Lenksysteme können jedoch besonders in Reihenkulturen für das Auffinden von Pflegespuren wie beispielsweise beim Hacken sinnvoll sein. Sie bringen auch bei Arbeiten ohne Spuranreisser und bei grossen Arbeitsbreiten einen wesentlich stärkeren Nutzen als bei der Saat mit Spuranreissern und gut sichtbaren Spurmarkierungen. Vorteile bei der Saat ergeben sich dann, wenn Spurmarkierungen wie bei der Nacharbeit oder bei der Direktsaat kaum sichtbar sind. Die kontinuierlich geraden Säreihen sind ein weiterer positiver Aspekt des Einsatzes von Lenksystemen. Sie ermöglichen einen einfacheren Einsatz von Geräten zur mechanischen Unkrautkontrolle wie auch von Droplegs an Pflanzenschutzgeräten, welche die Aufwandsmenge senken und gleichzeitig die Ausbringqualität steigern.

Der belegte Effekt der Fahrerentlastung zeigt, dass mit Lenksystemen Komfort und Ergonomie von Traktorarbeitsplätzen zunehmen. Die Fahrer sind länger leistungsfähig und die Arbeitsqualität verbleibt auf einem konstant hohen Niveau. Hierbei ist noch zu beachten, dass im Versuch Langzeiteffekte nicht erfasst werden konnten. Die Beobachtungszeiträume pro Fahrer lagen zwischen gut einer und knapp drei Stunden. Es ist anzunehmen, dass die positiven Auswirkungen von Lenksystemen wie Lenkgenauigkeit und Ausnutzung der Gerätearbeitsbreite bei längeren Arbeitseinsätzen und beim Fahren bei schlechten Sichtverhältnissen tendenziell stärker zum Tragen kommen.

Technik im Überblick

Wie funktionieren automatische Lenksysteme? Worauf ist zu achten? Die folgenden Seiten geben einen Überblick über die wichtigsten Aspekte.

Positionierung per Satellit

Die meisten Lenksysteme verwenden zur Erkennung der Spur das Global-Navigation-Satellite-System, kurz GNSS. Mit einer Antenne und einem Empfänger auf dem Traktor werden die Signale der GNSS-Satelliten empfangen. Aus diesen wird zuerst die aktuelle Position des Fahrzeugs berechnet und anschliessend die Fahrspur des Traktors bestimmt. Hier

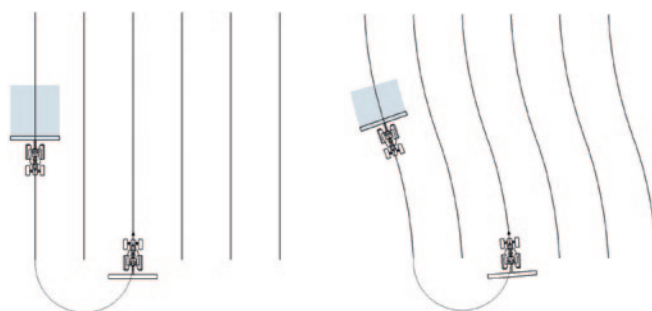


Abb. 4: Parallelfahrvarianten: links gerade A-B-Fahrt, rechts Konturfahrt. Quelle: Agroscope

gibt es verschiedene Varianten des Parallelfahrens. In Europa sind hauptsächlich gerade Fahrten von Punkt A nach Punkt B und das Konturfahren entlang geschwungener Vorgängerspuren verbreitet (Abb. 4).

Wie genau muss es sein?

Die generelle Positionsabweichung der GPS-Signale liegt aufgrund technischer und atmosphärischer Gegebenheiten bei zirka ± 3 bis 5 m. Zur Ansteuerung von Lenkungen ist dies zu ungenau. Mit Korrektursignalen von den Satelliten oder von erdgebundenen Funkstationen wird die Genauigkeit erhöht (Abb. 5). Je genauer und stabiler die Position sein soll, desto aufwändiger wird die benötigte Empfangs- und Korrekturtechnik. Bei Lenksystemen wird zur besseren Einordnung auch zwischen absoluter und Spur-zu-Spur-Genauigkeit unterschieden. Die absolute Genauigkeit gibt an, mit welcher Genauigkeit eine Position nach einigen Tagen oder auch Jahren wiedergefunden wird. Beim kostenlosen satellitengebundenen Korrektursignal Egnos beträgt diese beispielsweise zirka zwei Meter. Für die meisten landwirtschaftlichen Anwendungen ist allerdings die relative Genauigkeit innerhalb der nächsten Minuten, die Spur-zu-Spur-Genauigkeit, relevant. Sie wird erreicht, wenn innerhalb von 15 Minuten wieder an der Vorgängerspuren entlanggefahren wird, und beträgt bei Egnos 20 bis 30 cm. Bei langsamen Fahrgeschwindigkeiten, wie beispielsweise im Gemüsebau, wird diese Zeitspanne aber oft überschritten. Hier ist dann die absolute Genauigkeit des Systems relevant. Egnos wird bei einfachen Lenksystemen verwendet, die sich mit dieser Genauigkeit für grosse Arbeitsbreiten bei der Grunddüngung und organischen Düngung mit überlappenden Streubildern eignen. Egnos wird durch alle heutigen Geräte empfangen. Es steht aber nur bei Empfang des Korrektursatelliten zur Verfügung. Abschattungen können einschränkend wirken.

Für die Bodenbearbeitung (Scheibeneggen, Grubber, Saatbettkombinationen) mit grossen Arbeitsbreiten und genauem Anschlussfahren kommt die nächste Stufe mit kostenpflichtigen Satellitenkorrekturdiensten und einer Spur-zu-Spur-Genauigkeit von ± 10 cm in Frage.

Zum präzisen Säen, Pflanzen und Hacken muss es noch genauer sein. Hier beginnt der Bereich der Real-Time-Kinematik-Systeme, kurz RTK, die sowohl eine Spur-zu-Spur- als auch absolute Genauigkeit von $\pm 2,5$ cm liefern. Solche RTK-Systeme wurden auch im vorgängig beschriebenen Versuch eingesetzt.

Mit zunehmenden Ansprüchen an Genauigkeit und Signalverfügbarkeit, einem breiteren Angebot an RTK-Korrekturdiensten und sinkenden Preisen geht die Bedeutung kostenpflichtiger Satellitenkorrekturdienste zurück.

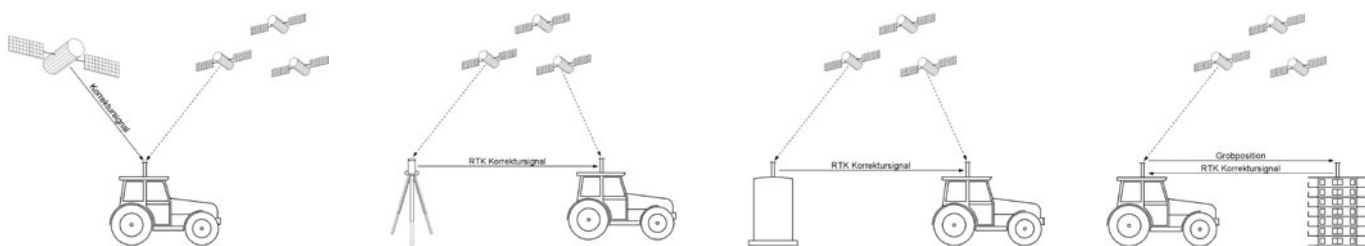


Abb. 5: GPS-Korrekturvarianten, von links nach rechts: via Korrektursatellit, via mobiler Basisstation am Feldrand, via fest installierter Basisstation am Hof oder beim Dienstleister, virtuelles Referenzsystem VRS mit Basisstationen-Netzwerk vom Dienstleister. Quelle: Agroscope

Genauigkeit ist nicht alles

GNSS-Lenksysteme werden oft über die erreichbare Genauigkeit definiert. Dies ist jedoch nur ein Aspekt. Wichtig ist auch die Verfügbarkeit und Funktionssicherheit. Diese lassen sich in die Bereiche Satelliten und Korrektursignal unterteilen. Für die Satelliten gilt: Je mehr, desto besser. Für eine Positionsbestimmung braucht es abhängig von der Systemgenauigkeit mindestens vier Satelliten und möglichst freie Sicht nach Süden. Gebäude, Waldränder und Baumgruppen hingegen schatten ab, es sind weniger Satelliten sichtbar und das Lenksystem fällt allenfalls aus. Hier hilft ein besserer Empfänger, der neben den amerikanischen Satelliten (GPS) auch die russischen Satelliten (GLONASS) verarbeitet. Im Durchschnitt können dadurch etwa 50 Prozent mehr Satelliten empfangen werden – die Verfügbarkeit des Lenksystems auf empfangskritischen Flächen erhöht sich stark. Durch Abschattungen wird auch der Empfang satellitengebundener Korrektursignale unterbrochen. Vor allem bei den Signalen für hohe Genauigkeiten um $\pm 10\text{cm}$ dauert es je nach Empfänger bis zu mehreren Minuten, bis die gewünschte Genauigkeit wieder zur Verfügung steht. Kurze Abschattungszeiten im Sekundenbereich werden durch die Software oder mit einem Kompass rechnerisch überbrückt. Bei einem längeren Ausfall des Korrektursignals kann hingegen nur mit einer verminderten Genauigkeit weitergearbeitet werden. Mit RTK steht das Signal nach Abschattungen oder Signalausfällen meist innerhalb weniger Sekunden wieder zur Verfügung. Bei Arbeiten, die eine hohe Genauigkeit erfordern, ist diese hohe Verfügbarkeit sehr wichtig.

RTK-Korrektursysteme

RTK-Systeme verwenden für die Korrektur fixe Referenzpunkte, die sich wenige Kilometer entfernt vom Traktor befinden. Auf den Referenzpunkten steht ein GNSS-Empfänger, genannt Basisstation. Dessen Korrekturinformationen werden über Funk an den Traktor übermittelt und ergeben nach einer Verrechnung mit den Positionsdaten des GNSS-Empfängers auf dem Traktordach die korrigierte Position. Es gibt verschiedene Varianten der RTK-Korrektur (Abb. 5):

– Die kundeneigene Basisstation wird vor Beginn der Arbeit auf dem Feld aufgestellt. Nach dem Aufstarten steht das System in wenigen Minuten zur Verfügung. Die Datenübertragung zwischen Basis und Traktor erfolgt mit Funkgeräten. Die Funkreichweite ist auf einem Schlag in der Regel ausreichend. Empfangsprobleme kann es allerdings bei kupierten Schlägen und Abschattungen durch Baumränder geben, insbesondere dann, wenn die Sichtverbindung nicht mehr sichergestellt ist.

– Wenn die Basisstation auf einem hohen Punkt wie zum Beispiel einem Silo des Hofes montiert wird, gibt es mehrere Vorteile. Das ständige Auf- und Abbauen der Basisstation entfällt, die Reichweite der Sichtverbindung erhöht sich und das Korrektursignal kann einfacher von mehreren Traktoren gleichzeitig genutzt werden. Diese Möglichkeit nutzen die Lenksystemanbieter, die beispielsweise Basisstationen bei Landtechnikhändlern aufbauen und unter Verwendung mehrerer Stationen ein Korrekturnetz realisieren. Der Kunde spart sich dann die Investition in eine eigene Basisstation und bezieht das Korrektursignal via Mobilfunknetz als Dienstleistung. Mit mehreren verfügbaren Basisstationen wird der Aktionsradius grösser, was insbesondere bei weiter verteilten Betriebsflächen oder für Lohnunternehmen relevant ist.

– Die sogenannten Virtuellen Referenzsysteme (VRS), die ursprünglich hauptsächlich von Vermessern genutzt wurden, bestehen aus RTK-Basisstationen im Abstand von 20 bis 30 Kilometer. Sie bilden ein landesweites oder regionales Netz. Der Traktor hat eine permanente Mobilfunk-Datenverbindung zum Rechenzentrum des Betreibers. Auf Basis der Grobposition des Traktors wird aus den Daten der umliegenden Basisstationen das Korrektursignal berechnet und an das Fahrzeug gesendet. Der grosse Vorteil ist, dass auf jeder Fläche mit Mobilfunkempfang auch das Korrektursignal zur Verfügung steht. Durch den Einsatz hochwertiger Antennen ist der Empfang auf einer Landmaschine im Vergleich zu einem Mobiltelefon besser.

Welche RTK-Lösung für den einzelnen Betrieb geeignet ist, hängt von der örtlichen Gegebenheit ab. Wenn das regionale Angebot an Korrektursignalen und die Empfangsstabilität mit Funkgeräten oder Mobilfunk auf den Schlägen stimmen, braucht man nicht unbedingt eine eigene Basisstation. In schwierigerem, weil hügeligem oder baumbestandenem Gelände kann es bei langen Schlägen eventuell auch vorkommen, dass keine Lösung befriedigend funktioniert. Alternative Spurführungssysteme wie Spuranreisser oder Schaummarkierer können deshalb nach wie vor notwendig sein.

Wenn es schwankt und driftet

Den Einfluss von Hangneigung und schwankenden Bewegungen während der Fahrt kompensieren Neigungssensoren. Sie halten den Traktor stabil und vermeiden eine Drift hangabwärts beziehungsweise Schlangenlinienfahrt. Wenn auch der Traktor in hügeligem Gelände spurgenauf fährt, so kann es doch sein, dass das Anbaugerät nicht exakt folgt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die



Abb. 6, oben: Nachlaufsteuerung Trimble TrueTracker. Mit zwei Antennen werden Traktor und Anbaugerät gleichzeitig auf Spur gehalten. Unten: Der hydraulische Verschieberahmen PSR Slide korrigiert Abweichungen des Anbaugeräts. Quelle: Geo-Konzept, Reichhardt

Antenne im Regelfall auf dem Traktor und nicht auf dem Gerät montiert ist. Durch die Dynamik im Anbausystem wird am Anbaugerät nie dieselbe Genauigkeit wie an der Antennenposition erreicht.

Zur Korrektur können Maschinen mit einem zusätzlichen Navigationssystem ausgerüstet werden. Die Positionskorrektur erfolgt zum Beispiel über steuerbare Scheibenseiche oder einen hydraulischen Verstellrahmen im Dreipunkt. Für angehängte Maschinen gibt es Nachlaufsteuerungen, die dafür sorgen, dass das Gerät direkt in der Traktorspur läuft (Abb. 6).

Von Hand oder automatisch lenken?

Lenksysteme werden nach der Umsetzungsart der Lenkkorrektur in manuelle Parallelfahrhilfen, Lenkassistenten- und automatische Systeme unterschieden. Vorneweg: Wer genau fahren möchte, braucht ein System mit integrierter Lenkkorrektur. Für präzise Arbeiten sind nur Lenkassistenten- und automatische Systeme geeignet.

Manuelle Parallelfahrhilfen werden nur bei Genauigkeiten von ± 30 cm eingesetzt. Ein Lichtbalken oder Monitor zeigt optisch den Grad der Abweichung an, die der Fahrer selbst korrigiert. Der Fahrer muss sich stark auf die Anzeige

konzentrieren, um Fahrspuren zu überspringen und genauer zu fahren. Der Entlastungsgrad ist gering und es gibt auch keine zusätzliche Zeit, um andere Kontrollaufgaben wahrzunehmen. Die manuellen Systeme werden häufig als Einstiegssystem verkauft, mit der Option, später einen Lenkeingriff nachzurüsten. Sie werden bei grossen Arbeitsbreiten in der Bodenbearbeitung sowie bei der Düngerausbringung auf Acker- und Grünland verwendet. Mit einer Markierungsfunktion ausgestattet können sie beispielsweise auch genutzt werden, um nach dem Wiederbefüllen des Düngerstreuers wieder an der richtigen Stelle fortzufahren.

Lenkassistentensysteme setzen die Positionsabweichung direkt in eine Lenkkorrektur um. Bei den meisten Systemen wird mit einem Elektromotor mit Reibrad direkt das Lenkrad angesteuert beziehungsweise das Serienlenkrad gegen ein Lenkrad mit integriertem Motorantrieb ausgetauscht (Abb. 7).

Das Lenksystem kann so schnell vom einen auf den anderen Traktor umgebaut werden. Eine Ausrüstung mit zusätzlichen, fest eingebauten Lenkkomponenten wie bei automatischen Lenksystemen entfällt in der Regel. Lenkassistenten- und automatische Systeme haben dieselbe Funktion wie die manuellen, entlasten den Fahrer aber spürbar, da er sich nicht mehr auf eine Anzeige konzentrieren muss. Da der direkte Lenkeingriff schneller ist als der manuelle, kann die bessere Genauigkeit höherwertiger Satellitenempfänger ausgenutzt werden.

Systeme mit integrierter Lenkkorrektur haben Vor- und Nachteile. Einerseits hat der Fahrer mehr Kapazität für das Wesentliche, da er sich voll und ganz auf die Arbeit der Maschine konzentrieren kann. Andererseits kann es bei langen Schlägen allenfalls zu Monotonie, Langeweile und Einschlafneigung kommen. Da bei Hindernissen in der Fahrspur immer manuell ausgewichen werden muss, ist dieser Punkt nicht zu vernachlässigen.

Kosten und Wirtschaftlichkeit

Die Kosten für ein Lenksystem variieren abhängig von Funktionsumfang, Genauigkeit, Umfang der Traktorvorausstattung und Anbieter stark. Parallelfahrhilfen von einfacher Genauigkeit sind ab etwa 1000 Franken, Lenkassistentensysteme mit einfacher Genauigkeit ab etwa 10 000 Franken und automatische RTK-Lenksysteme von höchster Genauigkeit ab etwa 20 000 Franken erhältlich. Die notwendige Flächenauslastung verringerte sich auf Grund sinkender Preise für die Lenksysteme. Sie bewegt sich heute zwischen weit unter hundert und mehreren hundert Hektaren. Bei den günstigsten Geräten fällt sich der Kaufentscheid wohl vor allem über den Komfortzuwachs. Bei den teureren ist es nötig, sich betriebsindividuell mit den Rahmenbedingungen eines wirtschaftlichen Einsatzes auseinanderzusetzen. Hier sei auf den ART-Bericht 659 «Parallelfahrssysteme für Traktoren – Technik und Wirtschaftlichkeit» (Holpp 2006) und das KTBL-Heft 67 «Parallelfahrssysteme» (Niemann et al. 2007) verwiesen.



Abb. 7.; links Reibradmotor zur Montage am Lenkrad, Mitte Lenkrad mit integriertem Motorantrieb zur Montage anstelle des Originallenkards, rechts Integration der Parallelführungssoftware in ein ISOBUS-Terminal. Quelle: Geo-Konzept, Reichhardt

Anbieter von Lenksystemen

Es gibt eine Vielzahl von Lenksystemanbietern. Die Auswahl an professionellen Systemen und die Möglichkeiten der Zusammenstellung betriebsspezifischer Lösungen werden immer grösser. Funktionalitäten wie Dokumentation über das Terminal, Fernzugriff des Servicetechnikers auf die Einstellungen des Lenksystems, Integration der Bedienung in das ISOBUS-Terminal (Abb. 7), Kombination mit einer Teilbreitensteuerung der Pflanzenschutzspritze oder zusätzlichen mechanischen oder auf Ultraschall

basierenden Sensoren zur direkten Orientierung am Pflanzenbestand komplettieren das Angebot. Die wichtigsten Anbieter sind in Tab. 1 aufgelistet. Eine detaillierte vergleichende Darstellung der Systeme ist aufgrund des umfangreichen Angebots an dieser Stelle nicht möglich. Weiterführende Informationen zum Thema finden sich beim Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft KTBL (www.ktbl.de); auch landtechnische Fachzeitschriften in Deutschland veröffentlichen regelmäßig Vergleiche von Parallelfahrssystemen.

Tab. 4: Anbieter von Lenksystemen.

Agco www.agcocorp.com	Müller Elektronik www.mueller-elektronik.de
Autofarm www.gpsfarm.com	Reichhardt www.reichhardt.org
Case New Holland www.cnh.com	Same Deutz-Fahr www.samedeutz-fahr.com
Claas www.claas-agrosystems.com	Teejet www.teejet.com
John Deere www.deere.com	Topcon www.topconpa.com
Leica Geosystems www.leica-geosystems.ch	Trimble www.trimble.ch

Literaturnachweis

- Amiama-Ares C., Bueno-Lema J., Alvarez-Lopez C. J. u. Riveiro-Valiño J. A., 2011. Manual GPS guidance system for agricultural vehicles. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 9 (3), S. 702–712.
- Berning F., 2011. Ganz genau geradeaus? *Top Agrar*, Nr. 3, S. 116–123.
- Böhrnsen A. u. Holtmann W., 2011. Präzision kostet. *Profi*, Nr. 6, S. 82–86.
- De Waard D., 1996. The Measurement of Drivers' Mental Workload. Dissertation, Wageningen, 136 S.
- Demmel M., 2007. Automatische Spurführung von Landmaschinen Systeme, Einsatzbereiche, Wirtschaftlichkeit. Landtechniktagung 26.01.2007, Präsentation, Schönbrunn.
- Dikow A., 2010. Ergonomische Aspekte der Arbeit. Vorlesungsreihe Arbeitswissenschaft 2010, Präsentation, Rostock.
- Gomez-Gil J., San-Jose-Gonzalez I., Nicolas-Alonso L. F. u. Alonso-Garcia S., 2011. Steering a Tractor by Means of an EMG-Based Human-Machine Interface. *Sensors*, 11 (7), S. 7110–7126.
- Holpp M., 2006. Parallelfahrssysteme für Traktoren. Technik und Wirtschaftlichkeit. ART-Berichte (Früher: FAT-Berichte), 659, S. 12. Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, Ettenhausen.
- Holpp M., 2010. Präzise Lenksysteme im Überblick. *Schweizer Landtechnik*, Nr. 2, S. 37–43.
- Holpp M., 2012. Untersuchungen zu Controlled Traffic Farming und automatischen Lenksystemen. Dissertation, DE-Witzenhausen/CH-Ettenhausen, 150 S.
- Keller J. 2005. Auto-Guidance-System – Effiziente Flächenbearbeitung, Dieserverbrauchsoptimierung, Steigerung der Wirtschaftlichkeit. *Landtechnik für Profis*, Magdeburg, Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI, VDI-Berichte, 1868, VDI Verlag GmbH, S. 106.
- Kroulik M., Kumhala F., Hula J. u. Honzik I., 2009. The evaluation of agricultural machines field trafficking intensity for different soil tillage technologies. *Soil & Tillage Research*, 105 (1), S. 171–175.
- Macak M. u. Nozdrovicky L., 2011. Economic Benefit of the Automated Satellite Guidance of the Field Machines. *Acta technologica agriculturae* 14 (2), Nitra.
- Moitzi G. u. Heine E., 2006. GPS kontra Mensch. *Der Fortschrittliche Landwirt*, Nr. 5, S. 38–42.
- Moitzi G., Heine E., Refenner K., Paar J. u. Boxberger J., 2007. Automatisches Lenksystem im Einsatz auf kleinen Flächen – Untersuchungen zum Arbeitszeit- und Kraftstoffaufwand sowie zur Systemgenauigkeit. 15. Arbeitswissenschaftliches Seminar 05./06.03.2007, Präsentation, Universität für Bodenkultur, Wien.
- Niemann H., Schwaiberger R. u. Fröba N. [Hrsg.], 2007. Parallelfahrssysteme. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V., Nr. 67, KTBL, Darmstadt, 54 S.
- Paridon H., 2006. Herzrate und Blickverlauf: Wie reagieren junge Fahrer? *AkademieJournal*, Nr. 3, S. 7.
- Reimer B., Mehler B. u. Coughlin J. F., 2010. An Evaluation of Driver Reactions to New Vehicle Parking Assist Technologies Developed to Reduce Driver Stress. MIT AGELAB, Cambridge, Massachusetts, USA.
- Reimer B., Mehler B., Coughlin J. F., Roy N. u. Dusek J. A., 2011. The impact of a naturalistic hands-free cellular phone task on heart rate and simulated driving performance in two age groups. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 14 (1), S. 13–25.
- Rüegg J., Total R., Holpp M., Anken T. u. Bachmann T., 2011. Satelliten-gesteuerte Lenksysteme im Feldgemüsebau – Stand der Technik, praktische Erfahrungen und Empfehlungen. *ACW-Flugschrift*, Forschungsanstalt Agroscope Changions-Wädenswil ACW, Wädenswil, 14 S.
- Schulten-Baumer F., Schmittmann O. u. Schulze Lammers P., 2009. Parallelfahrssysteme – Akzeptanz und Nutzen. *Landtechnik*, Nr. 1, S. 61–63.
- Winner H., Halkuli S. u. Wolf G., 2009. Handbuch Fahrerassistenzsysteme. *Viehweg + Teubner*, Wiesbaden, 697 S.