



Rationalisierungs-Kuratorium
für Landwirtschaft

Satellitengestütztes Arbeiten in der Landwirtschaft

Grundlagen und Anwendungen



Jan Henrik Ferdinand

**Satellitengestütztes Arbeiten in der Landwirtschaft
- Grundlagen und Anwendungen -**

Juni 2013

Jan Henrik Ferdinand ist studentischer Mitarbeiter beim RKL. Er studiert an der Fachhochschule Kiel, Fachbereich Agrarwirtschaft, 24783 Osterrönfeld

Herausgeber:

Rationalisierungs-Kuratorium für Landwirtschaft (RKL e.K.)

Albert Spreu

Grüner Kamp 15-17, 24768 Rendsburg, Tel. 04331-708110, Fax: 04331-7081120

Internet: www.rkl-info.de; E-mail: mail@rkl-info.de

Sonderdruck aus der Kartei für Rationalisierung

Nachdruck, auch auszugsweise, nur mit Zustimmung des Herausgebers

Was ist das RKL?

Das Rationalisierungs-Kuratorium für Landwirtschaft ist ein bundesweit tätiges Beratungsunternehmen mit dem Ziel, Erfahrungen zu allen Fragen der Rationalisierung in der Landwirtschaft zu vermitteln. Dazu gibt das RKL Schriften heraus, die sich mit jeweils einem Schwerpunktthema befassen. In vertraulichen Rundschreiben werden Tipps und Erfahrungen von Praktikern weitergegeben. Auf Anforderung werden auch einzelbetriebliche Beratungen durchgeführt. Dem RKL sind fast 1400 Betriebe aus dem ganzen Bundesgebiet angeschlossen.

Wer mehr will als andere, muss zuerst mehr wissen. Das RKL gibt Ihnen wichtige Anregungen und Informationen.

Inhalt	Seite
1. Einleitung	1455
2. Prinzip der Positionsbestimmung.....	1455
2.1 Umlaufbahnen	1456
2.2 Laufzeitmessung.....	1456
2.3 Errechnung der Position (Trilateration)	1457
2.4 Fehlerquellen	1458
2.4.1 Abschattung.....	1458
2.4.2 Reflektion (Multipath-Effekt)	1459
2.4.3 Satellitengeometrie	1459
2.4.4 Atmosphärische Effekte	1461
2.4.5 Weitere Fehler	1461
3. Was ist GPS?	1462
3.1 Geschichtlicher Hintergrund	1462
3.2 Satelliten.....	1462
3.3 Kontrollstationen	1463
3.4 GPS-Empfänger	1463
3.5 A-GPS	1464
3.6 Andere globale Navigations-Satelliten-Systeme	1465
3.6.1 GLONASS	1465
3.6.2 COMPASS.....	1466
3.6.3 GALILEO	1466
4. Differentiale-GPS Korrekturdaten	1466
4.1 Genauigkeiten.....	1467
4.1.1 Relative Genauigkeit.....	1467
4.1.2 Absolute Genauigkeit.....	14678
4.1.3 Spur-zu-Spur-Genauigkeit	14678
4.2 Kostenlose Dienste.....	1469
4.2.1 WAAS, EGNOS und MSAS	1469
4.2.2 Küstenfunk/ Beacon.....	1470
4.2.3 Herstellerlösungen.....	1470
4.3 Kostenpflichtige Dienste	1470

4.4	Real-Time-Kinematik	1471
4.4.1	Feste Stationen.....	1471
4.4.2	Mobile Stationen.....	1471
4.4.3	Netzwerk.....	1472
5.	Anwendungsmöglichkeiten	1474
5.1	Möglichkeiten der Parallelführung.....	1474
5.1.1	Manuelle Parallelführungssysteme	1475
5.1.2	Lenkassistenzsysteme.....	1476
5.1.3	Automatische Lenksysteme	1476
5.2	Geländekompensation.....	1477
5.2.1	Bewegung um die Längsachse (Rollen)	1477
5.2.2	Bewegung um die Querachse (Nicken)	1477
5.2.3	Bewegung um die Hochachse (Gieren)	1478
5.3	Steuerung des Anbaugerätes	1478
5.3.1	Passive Anbaugerätesteuerung.....	1478
5.3.2	Aktive Anbaugerätesteuerung.....	1479
5.4	Fahrstrategien.....	1479
5.5	Precision Farming.....	1484
5.5.1	Controlled Traffic Farming (Regelfahrspurverfahren)	1484
5.5.2	Strip Tillage (streifenweise Bearbeitung)	1484
5.5.3	Automatische Teilbreitenschaltung	1485
5.5.4	Teilflächenspezifische Düngung	1486
5.5.4.1.1	Offline-Verfahren	1488
5.5.4.1.2	Online-Verfahren	1489
5.6	Fahrzeuglogistik.....	1489
6.	Betriebswirtschaftliche Betrachtung	1490
6.1	Überlappungen und Fehlstellen.....	1490
6.2	Wirtschaftlichkeit.....	1491
7.	Fazit	1493
8.	Literaturverzeichnis.....	1493
9.	Abkürzungsverzeichnis	1494

1. Einleitung

Im Jahr 2050 müssen laut den Vereinten Nationen 9 Milliarden Menschen weltweit ernährt werden. Dieser steigende Bevölkerungszuwachs stellt hohe Anforderungen an die Lebensmittelproduzenten. Obwohl einerseits die Nahrungsversorgung gewährleistet werden muss, entsteht andererseits die Forderung nach umweltfreundlicher und nachhaltiger Bewirtschaftung. Durch zu intensive und falsche Ressourcennutzung leidet die Bodenfruchtbarkeit. Ökosysteme gehen durch die Erschließung neuer Bewirtschaftungsflächen verloren. Für die zukunftsorientierte Landwirtschaft sind Methoden und Anwendungen erforderlich, die einen optimalen Einsatz von Dünger und Pflanzenschutzmitteln, eine Einsparung von Betriebsstoffen sowie eine lückenlose Dokumentation unterstützen. Die zentimetergenaue Bewirtschaftung der Flächen im Bereich der Bodenbearbeitung, der Aussaat und der Ausbringung unterschiedlicher Mittel erfordert eine kontinuierliche Ortung der Maschinen. Anhand von mehreren Satellitensystemen auf unterschiedlichen Umlaufbahnen kann die Position des Anwenders per Empfänger ermittelt werden. Mit Hilfe von z.B. digitaler Kartierung der Bodenqualität, des Ertrages oder der Biomasse während der Vegetationsperiode kann die Bewirtschaftungsintensität an den Standort angepasst werden. Darüber hinaus erschließt sich eine vereinfachte Logistik und Dokumentation für den Anwender. In Echtzeit stehen Daten zur Verfügung, die digital abgespeichert für Vergleiche und Optimierungen herangezogen werden können. Das Produkt- und Leistungsangebot auf dem Markt wird aufgrund steigender Konkurrenz preiswerter und um innovative Funktionen erweitert. Jedoch ist das Grundlagenverständnis für die richtige Wahl des passenden Produktes notwendig. Dann kann der benötigte Funktionsumfang abgesteckt und das Angebotsspektrum eingeschränkt werden.

Die folgende Schrift soll das Prinzip der satellitengestützten Arbeit mit ihren unterschiedlichen Anwendungsmöglichkeiten und die verschiedenen Spezialisierungen im Bereich der Genauigkeitskorrektur erläutern.

2. Prinzip der Positionsbestimmung

Für eine Positionsbestimmung mittels mehrerer Satelliten sind unterschiedliche Informationen notwendig. Durch ihre Kombination kann der GPS-Empfänger den genauen Standort errechnen. Diese müssen hochgenau und zuverlässig bestimmt sein, da die Fehlergröße bei der Positionsbestimmung exponentiell zunimmt.

2.1 Umlaufbahnen

Jeder Satellit umläuft die Erde in einer vorgegebenen und vorher berechneten Bahnkurve, einem sogenannten Satellitenorbit, der kontinuierlich von Kontrollstationen auf der Erde korrigiert wird. Die für die Positionsbestimmung genutzten Satelliten umkreisen die Erde in einer mittleren Höhe von 20.200 m mit einer konstanten Geschwindigkeit von 11.000 km/h, woraus sich eine komplette Umlaufzeit von 11 Stunden und 58 Minuten auf dem Medium Earth Orbit (MEO) ergibt. Im Vergleich dazu liegen geostationäre ASTRA-Satelliten auf einer Umlaufbahn 42.300 km entfernt von der Erde. Der Verlauf wird in zeitlich konstanten Abständen in Positionstabellen, sogenannten Ephemeriden, festgehalten. Mehrere Tabellen dienen anschließend dem GPS-Empfänger für die Lokalisierung von den mit Ephemeriden hinterlegten Satelliten in seiner Reichweite. Diese Daten werden kontinuierlich auf dem Empfänger aktualisiert und führen bei längerem Verbindungsabbruch zu langen Initialisierungszeiten aufgrund des Downloads neuer Positionstabellen.

2.2 Laufzeitmessung

Jeder Satellit ist mit einer hochgenauen Atomuhr ausgestattet, um kleinste Messfehler zu verhindern. Anhand einer Laufzeitmessung kann der GPS-Empfänger mit Hilfe der bekannten Uhrzeit die Zeit zwischen dem Aussenden und dem Empfang des Signals messen. Da ein Empfänger aber keine teure Atom-Uhr integriert hat, entsteht das Problem der Zeitsynchronisierung. Wenn sich z.B. der Satellit genau über dem Empfänger befindet, erreicht das ausgesendete Signal diesen mit einer Verzögerung von 0,06 Sekunden. Folglich muss der Empfänger zeitversetzt navigieren, um synchron mit dem Satelliten zu arbeiten. Diese Verzögerung ist die errechnete Laufzeit und daraus resultierende Entfernung zum Satelliten. Für die Synchronisation wird ein pseudozufälliges Rauschen (PRN-Code) erzeugt, welches eine Abfolge von Ein/Aus-Impulsen darstellt. Dies dient der Sicherstellung, dass nicht zufällig ein anderes Signal vom Empfänger verwendet wird. Außerdem können anhand dieses komplexen Musters mehrere Satelliten mit unterschiedlichen pseudozufälligen Codes auf gleicher Frequenz senden. Aufgrund der Komplexität kann eine sehr genaue Laufzeit berechnet werden. Die heutigen Satelliten senden ihre Signale auf zwei Frequenzen aus, genannt das L-Band (L1 und L2). Momentan ist eine dritte L5-Frequenz im Aufbau und soll die Empfangsqualität zukünftig verbessern.

Da dem GPS-Empfänger der pseudozufällige Code des jeweiligen Satelliten bekannt ist, kann er diesen mit dem gerade empfangenen abgleichen. Abbildung 1 zeigt einen verschobenen PRN-Code. Die farbig hinterlegten Felder markieren den Ein-

Impuls, die weißen Zwischenräume sind Aus-Impulse. Die Verschiebung des Signals bis zur Deckungsgleichheit, wie in Abbildung 2 dargestellt, beschreibt die Signallaufzeit vom Satelliten zur Erde.



Abb. 1: Verschobener PRN-Code (www.kowoma.de)



Abb. 2: Deckungsgleicher PRN-Code (www.kowoma.de)

Daraus lässt sich anschließend die Entfernung berechnen [Satellitensignal (Lichtgeschwindigkeit) x Übertragungszeit = Empfängerentfernung].

2.3 Errechnung der Position (Trilateration)

Da dem GPS-Empfänger die Position mehrerer Satelliten bekannt ist, kann er um mindestens zwei einen virtuellen Kreis mit dem Radius der Laufzeit, also der jeweiligen Entfernung errechnen, wie auf Abbildung 3 in zweidimensionaler Ansicht erkennbar ist. Zwei Satelliten bilden mit ihren Kreisen zwei Schnittpunkte. Bei dieser Berechnung wird der Empfängerstandort auf die gemittelte Erdoberfläche, also die Meereshöhe, gelegt. Somit dient die Erde als dritter Kreis mit dem Radius 6.360 km. Einer der beiden Schnittpunkte liegt auf diesem und ist somit die Position.

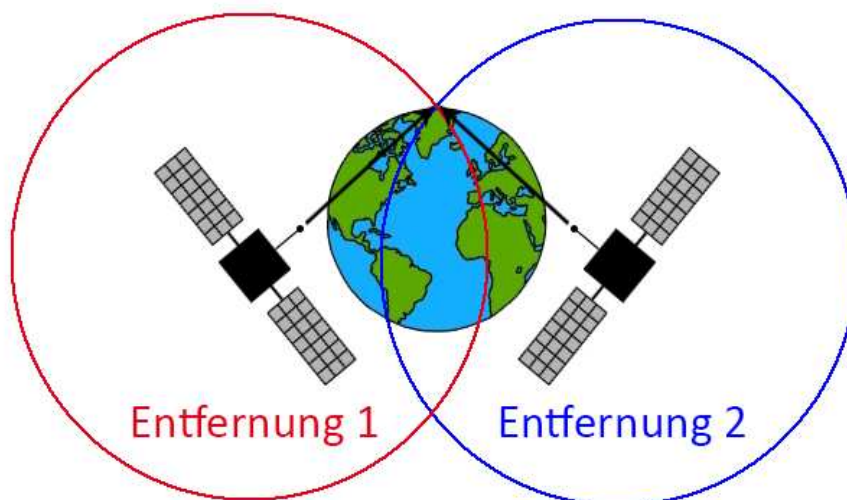


Abb. 3: Zweidimensionale Positionsbestimmung

Für die dreidimensionale Positionsbestimmung muss die exakte Laufzeit bekannt sein. Selbst ein Uhrenfehler von 1/100 Sekunde der in den GPS-Empfängern verwendeten Quarzuhren gegenüber den Atomuhren der Satelliten führt zu einer Fehlbestimmung von etwa 3.000 km. Für eine auf 10 m genaue Ortung muss eine Laufzeitgenauigkeit von 0,00000003 vorliegen. Somit wird die Position bisher mit sogenannten Pseudoentfernungen berechnet. Wird ein dritter Satellit hinzugezogen und geht man weiterhin von einer fehlerhaften Laufzeitmessung aus, schneidet dieser neue dritte Kreis nicht die bisher angenommene Position. Die Radien aller drei Kreise sind aufgrund des Fehlers meistens um mehrere Meter zu groß und bilden somit keinen eindeutigen Schnittpunkt. Durch eine Synchronisierung der Empfängeruhr wird ein Schnittpunkt gebildet und aus den Pseudoentfernungen entstehen echte Entfernungsangaben. Der Empfänger läuft mit Atomuhrgenauigkeit. Für die dreidimensionale Bestimmung wird neben dem Korrektursatelliten für die genaue Laufzeitmessung noch ein weiterer Satellit für die dritte Dimension benötigt. Die bisher als „Satellit“ genutzte Erde ist aufgrund falscher Laufzeiten bei einem Empfängerstandort auf Anhöhen oder Senken für die dreidimensionale Positionsbestimmung ungeeignet. Für die Praxis ist die Option einer zweidimensionalen Positionsbestimmung mit drei Satelliten und der Erde aber möglich. Das Verfahren der Positionsbestimmung durch mindestens vier Satelliten nennt sich Trilateration.

2.4 Fehlerquellen

Unterschiedliche äußere Einflüsse können zu erschwerter und fehlerhafter Positionsbestimmung führen. Moderne, technisch in den Empfänger integrierte Verfahren versuchen Ungenauigkeiten sowie Fehler zu minimieren und durch verbesserten Empfang von Positionsinformationen den fehlerhaften Signalanteil möglichst klein zu halten. Je mehr Satellitensignale empfangen werden können, umso kleiner wird der Anteil fehlerhafter Signale gehalten und die Genauigkeitsqualität steigt. Im folgenden Abschnitt sollen die verschiedenen Fehlerquellen genauer erklärt werden. Ausgenommen ist hier die „Selektive Verfügbarkeit“ (SA) der amerikanischen Regierung, die vor der Abschaltung im Jahr 2000 zu einer künstlichen Verschlechterung der Position um mehr als 50 m führte.

2.4.1 Abschattung

Das ausgesendete Signal kann durch lokale Hindernisse, wie z.B. Waldränder oder Gebäude abgeschattet werden. Daraus resultierend nimmt die Positionsgenauigkeit des Empfängers ab oder es kommt bei kompletter Abschattung zu einem

Signalabbruch und es muss bei anschließendem Sichtkontakt zu Satelliten durch Positionsänderung neu initialisiert werden.

2.4.2 Reflektion (Multipath-Effekt)

Dieser Effekt tritt besonders an hohen Gebäuden, nassen und metallischen Oberflächen oder anderen Erhebungen auf. Durch die Reflektion braucht das Signal länger, um den Empfänger zu erreichen, als das direkt empfangene Signal. Daraus resultiert eine fehlerhafte Laufzeitmessung von wenigen Zentimetern bis zu mehreren Metern. Diese Verfälschung wird Multipath- oder Mehrweg-Effekt genannt und macht sich in kleinen Sprüngen der angezeigten Position bemerkbar. Von der Konstruktion der Antenne sowie einer abschirmenden Grundplatte ist es abhängig, wie gut der Empfang reflektierter Signale unterdrückt werden kann. Es ist nicht möglich diesen Fehler rechnerisch zu kompensieren.

2.4.3 Satellitengeometrie

Die Satellitengeometrie beschreibt die Stellung der vom Empfänger aus gesehenen Satelliten zueinander im Raum. Eine schlechte Geometrie wäre gegeben, wenn z.B. alle fünf empfangenen Satelliten in nördlicher Richtung zum Empfänger stehen. Eine Positionsbestimmung findet gar nicht oder mit einer Ungenauigkeit von über 100 m statt. Eine sehr gute Geometrie kommt zustande, wenn aus jeder Himmelsrichtung ein Satellit empfangen werden kann. Hier erreichen die Laufzeitmessungen die höchsten Genauigkeiten. In Abbildung 4 und 5 sind die Kreise mit der pseudozufälligen Entfernung als Radius eingezeichnet. Die grauen Flächen beschreiben die Ungenauigkeiten bei der Laufzeitberechnung und den möglichen Bereich für die exakte Entfernung. Bei der günstigen Anordnung (Abbildung 4) ist die Schnittfläche, hier als die blau markierte Fläche gekennzeichnet, wesentlich kleiner und dadurch die Positionsbestimmung wesentlich genauer. Die Satelliten stehen fast im rechten Winkel zum Empfänger. Bei ungünstigeren Anordnung (Abbildung 5) stehen die Satelliten in Richtung des Empfängers fast hintereinander. Die Schnittfläche ist wesentlich größer und dementsprechend die Positionsbestimmung sehr ungenau. Darüber hinaus können auch lokale Hindernisse, wie z.B. Waldränder oder hohe Gebäude, die Satellitenkonstellation künstlich verschlechtern. Wenn ein Bereich des Himmels verdeckt wird, grenzt dies die zu empfangenen Signale ein und führt so zwangsläufig zu schlechten Winkeln zwischen den Sichtlinien zu vorhandenen Satelliten. In modernen Empfängern wird neben den empfangenen Satelliten auch ihre Position mit dem jeweiligen Winkel angezeigt. Somit kann die Empfängerposition für eine genaue Positionsbestimmung angepasst werden, um eine bestmögliche Satellitengeometrie zu gewährleisten.

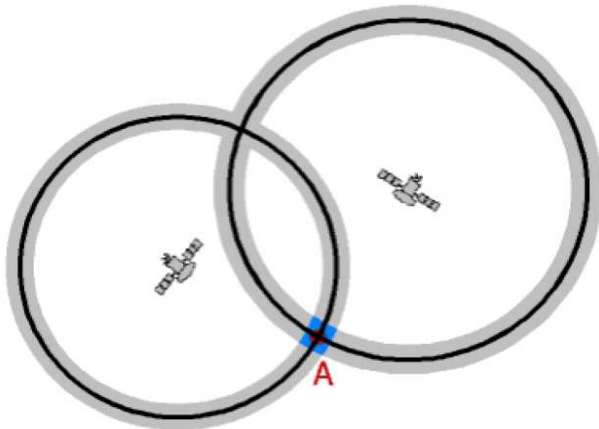


Abb. 4: Günstige Anordnung zweier Satelliten (www.kowoma.de)

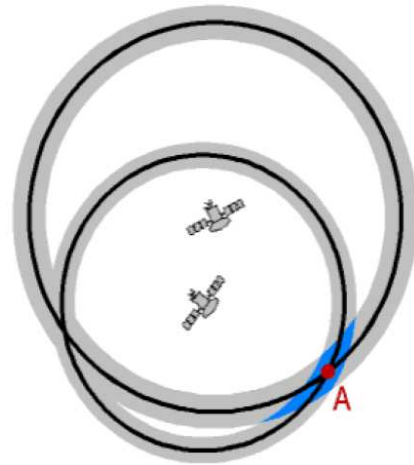


Abb. 5: Ungünstige Anordnung zweier Satelliten (www.kowoma.de)

Der meist verbreitete Richtwert für die Eignung einer Satellitengeometrie für die Positionsbestimmung ist der DOP-Wert (dilution of precision; Verschlechterung der Genauigkeit), welcher die Streuung der Messwerte beschreibt, aber selbst kein Maß für die Genauigkeit der Positionsbestimmung ist. Ein DOP-Wert von 1 beschreibt die bestmögliche Satellitenkonstellation, ein Wert von 6 ist gerade noch gut und DOP-Werte über 10 lassen keine Positionsbestimmung zu. Für die unterschiedlichen Berechnungen in den verschiedenen Dimensionen und unter Berücksichtigung der Zeit unterscheidet man zwischen verschiedenen DOP-Werten:

Tab. 1: Verschiedene DOP-Werte (Quelle: www.kowoma.de, verändert)

GDOP (Geometric Dilution Of Precision)	Gesamtgenauigkeit	3D-Koordinaten, Zeit
PDOP (Positional Dilution Of Precision)	Positionsgenauigkeit	3D-Koordinaten
HDOP (Horizontal Dilution Of Precision)	Horizontalgenauigkeit	2D-Koordinaten
VDOP (Vertical Dilution Of Precision)	Vertikalgenauigkeit	Höhe
TDOP (Time Dilution Of Precision)	Zeitgenauigkeit	Zeit

Der GDOP-Wert sollte für eine gute Positionsbestimmung nicht über 5 sein. Der PDOP-Wert ist am besten, wenn ein Satellit senkrecht über dem Empfänger und drei weitere in nahezu gleichem Winkel zueinander über den gesamten Horizont verteilt sind. Ein HDOP-Wert unter 4 ist sehr gut, über 8 jedoch schlecht. Je höher die

Satelliten am Himmel stehen, desto schlechter wird dieser Wert. Der VDOP-Wert verschlechtert sich, gegensätzlich zum HDOP-Wert, wenn die Satelliten sehr nahe am Horizont stehen. DOP-Werte werden von GPS-Empfängern häufig im NMEA-Datensatz, dem weitestgehend standardisiertem Format für Datenübertragung zwischen GPS-Geräten, zur Verfügung gestellt.

Neben diesem Wert als Größe für die Streuung der Messwerte gibt es den Offset als Verschiebung zur wahren Position. Dieser beschreibt die absolute Genauigkeit.

2.4.4 Atmosphärische Effekte

Darüber hinaus treten bei der Signalübermittlung weitere, einschränkende Messfehler auf. Die ausgesendeten Signale können in der Atmosphäre verfälscht werden. In der Ionosphäre führen geladene Teilchen zu Störungen. Dieser Bereich filtert normalerweise die elektronische Strahlung, die uns von anderen Planeten erreicht und bricht somit die Signale der Satelliten. Daraus folgt eine längere Laufzeit. Dieser Fehler kann größtenteils durch Berechnungen des Empfängers kompensiert werden. In der Troposphäre hingegen führt die Wasserdampfkonzentration, resultierend aus der aktuellen Wetterlage, zur Brechung und folglich zur verlängerten Laufzeit. Der durch die Troposphäre verursachte Fehler fällt kleiner als der Fehler der Ionosphäre aus, kann aber nicht durch komplexe Verfahren minimiert werden. Abhängig vom Wetter und der Stärke der zu reflektierenden Strahlung aus dem Weltraum fällt die Ablenkung und Brechung unterschiedlich intensiv aus. Durch die modernen Korrektursignaldienste EGNOS in Europa und WAAS in Amerika ist es mittlerweile möglich, atmosphärische Einflüsse als Korrektur in die Positionsbestimmung einfließen zu lassen.

2.4.5 Weitere Fehler

Die sehr präzisen Umlaufbahnen der Satelliten weichen durch Einfluss von Mond und Sonne geringfügig von ihrer Ideallinie ab. Obgleich diese regelmäßig von Kontrollstationen kontrolliert und korrigiert werden, führen die Schwankungen dennoch zu einem Fehlerpotenzial von bis zu zwei Metern. Des Weiteren führt die Ungenauigkeit der Empfänger-Uhr trotz Synchronisierung zu einem Fehler von ca. zwei Metern. Durch Rundungs- und Rechenfehler des Empfängers entsteht außerdem eine Ungenauigkeit von einem Meter.

3. Was ist GPS?

Das Global Positioning System (GPS), offiziell NAVSTAR-GPS (Navigational Satellite Timing And Ranging)-GPS der amerikanischen Regierung, lässt sich in drei grundlegende Segmente unterteilen, die im folgenden Abschnitt erläutert werden. Das GPS-System war Vorreiter in zuverlässiger, satellitengestützter Positionsbestimmung und ist das bisher hauptsächlich angewandte System in moderner Navigationstechnik.

3.1 Geschichtlicher Hintergrund

Die amerikanische Navy, die Air Force und die Army hatten in den 1960er Jahren Pläne und Ideen für militärisch angewandte Satellitentechnologie ausgearbeitet. Im Jahr 1973 genehmigte die US Regierung ein Konzept aller drei Streitkräfte, die Grundlage des heutigen NAVSTAR-GPS. Der erste Satellit dieses Systems wurde 1974 zu Testzwecken in den Weltraum geschossen. Zwischen 1978 und 1985 folgten weitere elf voll funktionsfähige Satelliten der ersten Generation. Das ursprünglich für militärische Zwecke ausgelegte Satellitensystem wurde ab 1983 für den zivilen Gebrauch freigeschaltet. Ein Schlüsselereignis für diese Aufhebung war der Abschuss eines zivilen koreanischen Passagierflugzeugs über sowjetischem Territorium, das durch falsche Navigation irrtümlich vom eigentlichen Kurs abgekommen war. Dennoch verringerte die US Regierung die Genauigkeit nach Freischaltung künstlich um mehr als 50 Meter. Diese selektive Verfügbarkeit (SA) wurde im Mai 2000 abgeschaltet, wodurch sich die Genauigkeit auf bis zu wenige Meter verbesserte. Die USA hält sich weiterhin die Möglichkeit der Abschaltung einzelner Satelliten offen. Die höhere Genauigkeit eröffnete neue Möglichkeiten in der zivilen Navigation und im Bereich der Verkehrstechnik sowie der Luftfahrt und gilt als Grundstein für das Precision Farming in der Landwirtschaft. Ab 2014 sollen die ersten acht Satelliten der 6. Generation auf ihre Umlaufbahn gebracht werden.

3.2 Satelliten

Das Weltraumsegment umfasst mittlerweile 32 Satelliten in etwa 20.200 km Höhe auf sechs Umlaufbahnen mit einer Neigung von 55° gegen den Äquator (Inklination). Die mittlerweile 5. Generation der Satelliten hat sich technisch stark weiterentwickelt, behält aber dennoch den gleichen Antrieb der ersten Generation mit einzig stärkeren Solarpanels bei. Die ursprünglichen Satelliten waren für eine Lebensdauer von 4,5 Jahren konzipiert. Im Laufe der Zeit wurde die Technik erneuert und neue Funktionen, wie z.B. die zweite L2-Frequenz des L-Bandes im Jahr 2005 mit der

nächsten Generation an Satelliten für eine verbesserte zivile Signalübertragung eingeführt. Mit der bisher aktuellsten Generation wurde nun die L5-Frequenz als drittes ziviles Signal hinzugefügt, ist aber erst in Zukunft serienmäßig erhältlich. Seit der 3. Generation ist der Austausch von Bahndaten zwischen den Satelliten möglich, was zu einer eigenen Bahndatenkorrektur führt. Ein Satellit kostet etwa 75 Millionen US \$ und ist mit drei Atomuhren bestückt. Die Abstrahlungsleistung beträgt momentan aber lediglich maximal 50 Watt, was in etwa die Hälfte der Leistung eines ASTRA-Satelliten entspricht. Dies führt zu einer hohen Anfälligkeit gegenüber bereits genannten Fehlerquellen.

3.3 Kontrollstationen

Das zweite Segment sind die Kontrollstationen. Die Kontrolle des GPS-Systems liegt ausschließlich in den Händen der US Air Force. Diese teilen sich auf in eine bemannte Hauptkontrollstelle in Colorado Springs (USA) sowie seit 2005 in insgesamt zehn unbemannte Monitorstationen nahe des Äquators. Daraus resultierend kann jeder Satellit 24 Stunden lang von mindestens zwei Stationen empfangen werden. Dies führt zu einer genaueren Überwachung und kontinuierlicheren Korrektur der Bahndaten und für den Anwender zu einer verbesserten Positionsgenauigkeit. Durch fünf weitere, für die Zukunft geplante Monitorstationen, könnte jeder Satellit von mindestens drei Stationen empfangen werden und so zu einer noch exakteren Laufzeitmessung führen. Die unbemannten Stationen sind einzig größere GPS-Empfänger, die Messdaten der in Sichtweite liegenden Satelliten sammeln und für die Weiterverarbeitung an die Hauptkontrollstelle senden. Darüber hinaus sind drei der zehn unbemannten Standorte Sendestationen von Korrekturdaten. Durch Auswertung der Rohdaten von Uhrzeiten und Umlaufbahnen in Colorado Springs können Fehlfunktionen schnell festgestellt und aktuelle Ephemeridendaten errechnet werden. Diese werden bis zu zweimal am Tag über die verschiedenen Kontrollstationen an die Satelliten zurückgesandt. Aufgrund der Kommunikation der Satelliten untereinander kann der Empfangsintervall von aktuellen Bahndaten theoretisch 180 Tage betragen.

3.4 GPS-Empfänger

Unter das Benutzersegment fallen GPS-Empfänger jeglicher Art. Sie erreichen die Kompaktheit einer Armbanduhr und lassen sich in GPS-Mäuse, Logger, Navigationsgeräte sowie Präzisionsgeräte unterteilen. Erstere liefern ausschließlich fortlaufende Positionsdaten und werden z.B. über USB-Schnittstelle oder Bluetooth mit externen Geräten zur Weiterverarbeitung der Daten verbunden. Ein Logger hat die gleiche Funktion einer GPS-Maus, kann aber darüber hinaus die Daten intern

abspeichern und nach Abschluss der Messung diese über eine entsprechende Schnittstelle auslesen lassen. Navigationsgeräte besitzen außerdem Displays, auf denen Positionsdaten, Wegpunkte sowie elektronische Karten dargestellt werden. Das System errechnet nach benutzerdefinierten Vorgaben die optimale Route. Für die Landwirtschaft am interessantesten sind die Präzisionsgeräte. Diese Industrieempfänger sind mit tellergroßen Antennen ausgestattet und liefern mit entsprechendem Korrektursignal eine zentimetergenaue Positionsbestimmung. Neben der Landwirtschaft finden diese Geräte u.a. in der Vermessung Verwendung. Mit dem Stand 2013 können neue Empfänger GLONASS-Satelliten empfangen und dadurch ihre Genauigkeitsqualität verbessern. Die gängigsten GPS-Empfänger können das kostenlose, über Satellit übertragene europäische EGNOS-, das amerikanische WAAS-, oder das japanische MSAS-Korrektursignal empfangen und ihre Genauigkeit auf unter fünf Metern verbessern.

3.5 A-GPS

Herkömmliche, bereits oben genannte GPS-Empfänger sind für eine kontinuierliche Positionsbestimmung im Freien ausgelegt. Somit führen längere Verbindungsunterbrechungen und die damit einhergehenden Standortwechsel eines Empfängers zu einer Neuberechnung der aktuellen Position. Folglich ist von der Aktualität der im GPS-Empfänger gespeicherten Bahndaten die entsprechende Zeit bis zur ersten Positionsbestimmung abhängig. Diese Daten müssen für eine exakte Berechnung der eigenen Position bekannt sein. Da diese Umlaufdaten aber in der Praxis vom theoretisch berechneten Wert abweichen, senden die Satelliten ihre aktuell korrigierten Bahndaten kontinuierlich über das GPS-Signal an den Empfänger. Verbindungsabbrüche im Bereich von vier Stunden können aufgrund der noch aktuell hinterlegten Umlaufdaten der Satelliten beim sogenannten „Hot Start“ des Systems überbrückt werden und führen somit zu einer Positionsbestimmung von unter zehn Sekunden. Bei längeren Zeitintervallen, in denen alle bereits bekannten Satelliten mit ihren Umlaufdaten nicht mehr erreichbar sind, muss durch einen „Autolocate“, einer automatischen Neulokalisierung, der Empfänger die aktuelle Satellitenkonstellation abfragen und die jeweiligen, aktuellen Bahndaten neu laden. Diese Berechnungszeit kann bei mehreren Tagen ohne Empfang bis zu 12 Minuten dauern. Für die direkte Verwendung nach Einschalten des GPS-Empfängers sind lange Wartezeiten einschränkend.

Abhilfe schafft hier das Assisted-GPS (A-GPS). Mit diesem System werden Hilfsdaten über z.B. Mobilfunk oder Internet an den Empfänger gesendet, um eine schnellere Positionsbestimmung zu initialisieren. Über die Einwahl z.B. eines Smartphones mit integriertem GPS-Empfänger in Funkzellen können anhand dieser die grobe Position bestimmt und dementsprechend der Suchbereich für die

Satellitensignale eingegrenzt werden. Hierfür sind mindestens drei Basisstationen erforderlich. Die Bahndaten werden von Referenzstationen bereits vorher gelesen und anschließend dem mobilen Empfänger für bis zu zehn Tage im Voraus gesendet. Darüber hinaus können auch Korrekturinformationen aus dem Bereich des Differential-GPS übertragen werden. Darunter fallen kostenlose oder kostenpflichtige Korrekturdaten, die je nach System die Genauigkeit von mehreren Metern auf bis zu 2,5 cm verbessern können. Eine Verarbeitung dieser Daten hängt aber vom GPS-Empfänger ab. Bei der Übertragung fallen für den Anwender Mobilfunkgebühren an, wodurch eine Datenflatrate erforderlich ist. Seit 2009 besitzen alle GPS-fähigen Smartphones sowie alle GSM-fähigen Navigationsgeräte die Funktion des A-GPS und schaffen somit Abhilfe bei längerer Zeit der Abschaltung.

3.6 Andere globale Navigations-Satelliten-Systeme

Neben dem amerikanischen GPS gibt es heute weitere GNSS (Globales Navigations Satelliten System), die unterstützend zu den bisherigen Satelliten weitere Bereiche der Erde besser abdecken und in Zukunft ihre Anzahl und Funktionen erweitern.

3.6.1 GLONASS

Die ehemalige UdSSR entwickelte seit 1972 ein eigenes Satellitensystem, genannt GLONASS (Globalnaja Nawigazionnaja Sputnikowaja Sistema). 1982 wurden die ersten Satelliten auf ihre Umlaufbahnen geschossen. Nach Zusammenbruch der Sowjetunion schrumpfte die Anzahl der bisher 25 Satelliten auf sieben. Bis zum Frühjahr 2011 stieg die Zahl der voll funktionsfähigen Satelliten auf 24. Diese liegen auf einem Medium Earth Orbit (MEO) in drei Bahnebenen in 19.100 km Höhe und mit einer Inklination von 64,8°. Im Gegensatz zum GPS senden GLONASS-Satelliten ihre Signale mit gleichem Code auf unterschiedlichen Frequenzen. Das System besitzt vier Kontrollstationen in Russland sowie eine in der Ukraine. Die 2008 erstmals funktionierende Unterstützung des GPS-Systems durch GLONASS-Satelliten ist mit dem Jahr 2013 in Smartphones und weiteren GPS-Empfängern serienmäßig vorhanden. Da das System fast ausschließlich zusätzlich zu den GPS-Satelliten agiert, führt dies zu einer deutlich besseren Signalverfügbarkeit. In den durch das GPS schlechter abgedeckten nördlichen Breiten sowie in Abschattungen durch lokale Hindernisse wie z.B. Wälder, ist nun eine zuverlässigere Positionsbestimmung möglich. In der Praxis führt dies für unsere Breiten nach einer Untersuchung der Fachhochschule Kiel im Mittel zu zwei zusätzlichen Satelliten.

3.6.2 COMPASS

Das chinesische Satellitennavigationssystem COMPASS ging Ende 2011 offiziell in den Testbetrieb. Das funktionstüchtige System soll aus insgesamt 25 Satelliten bestehen und bis zum Jahr 2020 auf 35 Satelliten aufgestockt werden. Es soll die Abhängigkeit zum GPS im asiatisch-pazifischen Raum vermindern. Genaue Frequenzangaben können erst nach Testabschluss bekannt gegeben werden.

3.6.3 GALILEO

Das europäische Satellitennavigationssystem gehört zu den sogenannten „Leuchtturmprojekten“ der Europäischen Union und hat ihren Hauptsitz in Prag. Das im Aufbau stehende zivile Projekt soll zuverlässig und unabhängig Anwendung im offenen Dienst mit kostenlosem Signalempfang über zwei Sendefrequenzen, im kommerziellen Dienst über kostenpflichtige, verschlüsselte Sendefrequenzen, im sicheren Dienst, im staatlichen Dienst für hoheitliche Dienste wie z.B. der Polizei oder im Such- und Rettungsdienst finden. Die Verfügbarkeit erster Dienste ist ab 2014/2015 vorgesehen. GALILEO benutzt zusammen mit GPS die L1- sowie L5-Frequenz. Die finale Konstellation soll aus insgesamt 30 Satelliten auf drei Bahnebenen in einer Höhe von 23.260 km und einer Inklination von 56 bestehen. Der operative Betrieb kann etwa ab 2016 aufgenommen werden. Bisher umfasst das System vier Satelliten.

4. Differentiale-GPS Korrekturdaten

Die Genauigkeit von GPS kann durch differentielle Korrekturen erheblich verbessert werden. Diese werden kostenpflichtig, aber auch kostenlos von einer Basis- oder Referenzstation ermittelt und mit Hilfe von z.B. Datenfunk, Mobilfunk oder Satellit an den GPS-Empfänger übermittelt. Ein differentiel korrigiertes GPS-Signal berücksichtigt demnach den errechneten Laufzeitfehler in seiner Positionsberechnung. Dieser wird von der jeweiligen Station mit bekannter geographischer Position für jeden Satelliten ermittelt. Durch die Abweichung der empfangenen Position gegenüber der tatsächlich bekannten Position der ortsfesten Station kann der Laufzeitfehler errechnet und an den Empfänger gesendet werden. In der Regel sind der D-GPS-Empfänger sowie die entsprechende Empfangsantenne in das normale GPS-Gerät integriert. Die meisten Anbieter liefern mittlerweile auch Korrekturdaten für das GLONASS-System.

4.1 Genauigkeiten

Verschiedene Anwendungen erfordern unterschiedliche Genauigkeiten, die von Korrekturdiensten je nach Aufpreis unterschiedlich hoch angeboten werden. Diese statischen Maßzahlen zeigen an, wie genau die Positionsmessung mit einer vorher definierten Wahrscheinlichkeit ist. Hier unterscheidet man zwischen Wahrscheinlichkeiten von 50 % (CEP), 63-67 % (RMS) und 95 % (2RMS). Eine Angabe von 15 cm (2RMS) würde bedeuten, dass 95% der Positionsmessungen des Empfängers sich über 24 Stunden in einem Umfeld von 15 cm befinden. Darüber hinaus unterteilt man die Genauigkeitsangaben in drei Kategorien, die nachfolgend erklärt werden.

4.1.1 Relative Genauigkeit

Diese Genauigkeit beschreibt den Unterschied zwischen Positionen, die mit einem Empfänger zu unterschiedlichen Zeitpunkten gemessen wurden und in Abbildung 6 mit roten Punkten gekennzeichnet sind. Zusammen ergeben diese eine Fläche. Ihre Größe ist ausschlaggebend für die Genauigkeit zwischen den verschiedenen Messpunkten. Die Verschiebung gegenüber der tatsächlich, hier blau markierten Position ist bei dieser Genauigkeit zu vernachlässigen. Die Abbildung 6 zeigt somit eine hohe relative Genauigkeit. Diese ist z.B. bei der Größenmessung eines Feldes notwendig. Die tatsächliche Verschiebung der gemessenen Positionen an der Feldkante ist irrelevant. Einzig der korrekte Abstand der Punkte untereinander muss für eine genaue Größe eingehalten werden.

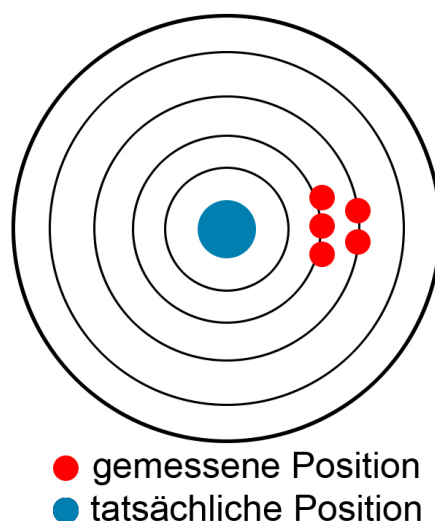


Abb. 6: Hohe relative Genauigkeit (Quelle: geo-konzept)

4.1.2 Absolute Genauigkeit

Mit dieser Genauigkeit wird die Wiederholbarkeit von Messungen eines Empfängers zu unterschiedlichen Zeitpunkten gegenüber ihren tatsächlichen Positionen erfasst. Liegen die gemessenen Werte, wie in Abbildung 7 dargestellt, nahe an der tatsächlichen Position spricht man von einer hohen absoluten Genauigkeit. Für hochgenaue Arbeitsgänge, wie z.B. der Strip Tillage, sind wiederholbare Positionsbestimmungen unerlässlich. Nach streifenweiser Düngerinjektion müssen diese Bahnen zentimetergenau für die anschließende Saat abrufbar sein. Die absolute Genauigkeit sollte hier mit einem RTK-Korrektursignal höchstens 2,5 cm (2RMS) betragen. Der eigentliche Bezugszeitraum von 24 Stunden erweitert sich mit diesem Korrektursignal um mehrere Jahre.

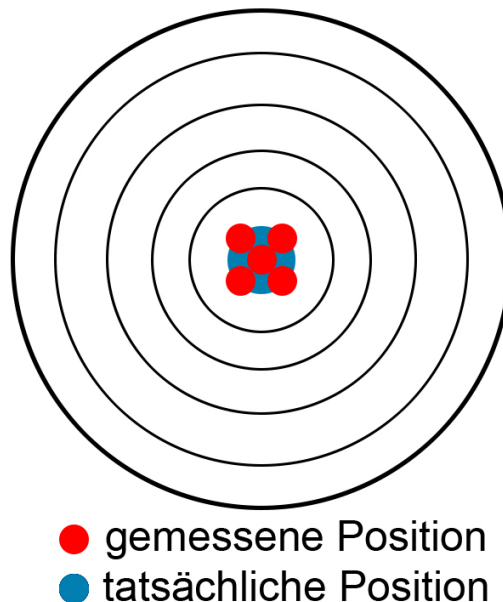


Abb. 7: Hohe absolute Genauigkeit (Quelle: geo-konzept)

4.1.3 Spur-zu-Spur-Genauigkeit

Diese spezielle Form der relativen Genauigkeit beschreibt, wie genau der Abstand zwei nacheinander gefahrenen Spuren in einem Zeitraum von 15 bis 30 Minuten ist. Ein kleinerer Spurfehler führt daher zu weniger Überlappung. Somit würde eine Genauigkeit von 20 cm (2RMS) bedeuten, dass in 95 % der Zeit der Abstand zu einer in den letzten 15-30 Minuten gefahrenen Fahrspur bei maximal 20 cm liegen würde. Anwendung findet diese Genauigkeit bei dem Vergleich unterschiedlicher Korrektursignale. Für z.B. den Stoppelbruch ist eine hohe Spur-zu-Spur Genauigkeit gegenüber der absoluten Genauigkeit wichtiger, da diese bei der Anschlussfahrt die Überlappung minimiert. Das relative Verhältnis der gefahrenen Spuren zueinander

muss möglichst gering sein. Bei einer Unterbrechung von über 24 Stunden ist der Positionsdrift in Höhe der absoluten Genauigkeit manuell im GPS-Terminal anzupassen. Diesen erkennt man durch Einsetzen des Arbeitsgerätes an zuletzt bearbeiteter Stelle und den daraus entstehenden Versatz auf der elektronischen Karte. Nach Anpassung kann daraufhin in den nächsten 15-30 Minuten mit entsprechend angegebener Spur-zu-Spur Genauigkeit des Korrektursignals zur eingemessenen Spur gearbeitet werden.

4.2 Kostenlose Dienste

Die kostenlosen Korrektursignale laufen über die L1-Frequenz und sind daher nur eingeschränkt für hochgenaue Arbeiten, wie z.B. die Aussaat geeignet. Für Ertragskartierungen, Flächenvermessungen, einzelne Positionsbestimmungen sowie der Verringerung von Überlappungen und Fehlstellen beim Einsatz von Parallelführungssystemen ist die Genauigkeit dennoch ausreichend.

4.2.1 WAAS, EGNOS und MSAS

Mit den satellitenbasierten Ergänzungssystemen (SBAS) werden Satellitensysteme, vor allem aber GPS, unterstützt. Im Einsatz sind das nordamerikanische WAAS, das europäische EGNOS sowie das japanische MSAS. Weitere Systeme sind, wie in Tabelle 2 erkennbar, im Aufbau. Die SBAS-Systeme bieten zusätzliche Informationen an, welche über geostationäre Satelliten übertragen werden und zu einer höheren Verfügbarkeit, Genauigkeit als auch Zuverlässigkeit der Positionsbestimmung führen. Durch 25 Monitorstationen des amerikanischen WAAS und 34 Stationen des europäischen EGNOS werden die normalen GPS- sowie GLONASS-Signale empfangen und Fehler in den Satellitenpositionen, den Uhren und der Ionosphärenfehler errechnet und an die jeweilige Hauptrechenstation geschickt. Diese sendet die Korrektursignale an die geostationären Satelliten. Durch Erstellung eines Korrekturgitters für den atmosphärischen Fehler kann jeder GPS-Empfänger selbst seine Fehlerkorrektur vornehmen. Dieser Unterschied gegenüber normalem DGPS macht es möglich, dass der Empfänger auch in größerer Entfernung zu einer Referenzstation durch andere atmosphärische Einflüsse den Fehler errechnen kann. Neben der Übertragung der Positionsinformationen können die Satelliten darüber hinaus auch bei der Trilateration weitere Systemsatelliten imitieren. In allen Ergänzungssystemen des SBAS wird das einheitliche Datenformat NMEA verwendet. Durch Versendung der Korrekturdaten über die L1-Frequenz kann jeder herkömmliche GPS-Empfänger diesen kostenlosen Dienst nutzen. Die Spur-zu-Spur Genauigkeit liegt bei 10-30 cm und die absolute Genauigkeit liegt bei 1 bis 2 m.

Tab. 2: SBAS-Systeme

WAAS	Nordamerika	in Betrieb
EGNOS	Europa	in Betrieb
MSAS	Japan	in Betrieb
GZSS-SAIF	Japan	im Aufbau
SDCM	Russland	im Aufbau
GAGAN	Indien	im Aufbau

4.2.2 Küstenfunk/ Beacon

Das ursprünglich für die Schifffahrt vorgesehene Küstenfunkkorrektursignal (Beacon) kann ab Anfang 2005 deutschlandweit kostenlos per Funkübertragung genutzt werden. Das Korrektursignal erlaubt eine Spur-zu-Spur-Genauigkeit von 15-30 cm, sowie eine absolute Genauigkeit von 50-75 cm und kann seit 2011 auch Korrekturdaten für GLONASS-Satelliten übermitteln.

4.2.3 Herstellerlösung

Das Starfire 1-Signal von John Deere mit 15-30 cm Spur-zu-Spur-Genauigkeit sowie 50 cm absoluter Genauigkeit steht über die L1-Frequenz allen Besitzern von GPS-Empfängern der Marke John Deere kostenlos zur Verfügung. Die geostationären Satelliten des, im weitesten Sinne als SBAS-System bezeichnete Starfire-Korrektursignals, können aufgrund anderer Signale und Datenformate nicht für die normale Positionsbestimmung genutzt werden.

4.3 Kostenpflichtige Dienste

Kostenpflichtige Signale werden in der Regel über Empfänger mit beiden L-Frequenzen empfangen. Sie bieten eine deutlich bessere Sendequalität und eine exaktere Genauigkeitskorrektur. Die Hersteller John Deere mit ihrem Starfire 2-Signal als auch Trimble mit dem Omnistar HP/XP-Signal bieten zwei Korrekturdienste mit jeweils einer Spur-zu-Spur-Genauigkeit von 5 bis 10 cm sowie einer absoluten Genauigkeit von 20 cm an. Beide Dienste senden ihre Korrekturdaten über Satelliten und haben das GLONASS-System integriert. Die Lizenzen müssen für einen beschränkten Zeitraum durch Kauf freigeschaltet werden.

4.4 Real-Time-Kinematik

Mit der Real-Time-Kinematik (RTK) wird auf dem Markt von unterschiedlichen Herstellern ein kostenpflichtiger Korrekturdatendienst mit einer Spur-zu-Spur- sowie absoluten Genauigkeit von 2,5 cm angeboten. In den folgenden Punkten sollen die verschiedenen Möglichkeiten der Signalübertragung über verschiedene RTK-Referenzstationen erklärt werden.

4.4.1 Feste Stationen

Feste Referenzstationen können auf eigenen Hochsilos oder anderen hohen Gebäudeteilen installiert werden. Hierfür ist einzig eine Kabelverbindung von der oftmals in einem Schaltschrank montierten Basisstation zur Antenne notwendig. Aufgrund ihrer Höhe und der beschränkten Sendeleistung durch die Bundesnetzagentur kann eine maximale Signalreichweite von 25 km erreicht werden. In der Praxis liegt das Mittel im ebenen Gelände bei 10-15 km und beispielsweise im hügeligen Ostholstein bei etwa 5-8 km. Resultierend aus der durchdachten Bauweise in Antennen auf dem höheren Gebäudeteil sowie den restlichen Komponenten im Schaltschrank sind alle Bauteile bei Wartungsarbeiten schnell erreichbar. Im Senderadius einer festen Referenzstation können nahezu unbegrenzt viele Fahrzeuge Korrekturdaten empfangen, was für Betriebe mit arrondierten Flächen und großem Maschinenpark gegenüber Einzellizenzen aus dem RTK-Netzwerk preiswerter ist. Bereiche, die im Funkschatten liegen, wie z.B. Täler oder ungünstige Waldrandgebiete, können durch Repeater erreicht werden. Somit kann nicht die Reichweite der Referenzstation, sondern die Abdeckung optimiert werden. Für Lohnunternehmer und Landwirte mit mehreren Betriebsteilen, die den Radius einer Station überschreiten, kommt demnach eine einzelne, fest installierte Station (bei Einbuße der genauen RTK-Korrektur) nicht in Frage.

4.4.2 Mobile Stationen

Eine mobile Referenzstation besteht aus dem RTK-GPS-Empfänger (siehe Abbildung 8), mit eigener 12 V Stromversorgung sowie einem Funkmodem. Sie wird an den Feldrand oder ähnlich nahe Orte gestellt, die eine ungehinderte Signalübertragung zur mobilen Station gewährleisten. Der Aufbau dauert etwa fünf Minuten und die Initialisierungszeit liegt bei wenigen Sekunden. Die Reichweite ohne Abschattung beträgt anschließend etwa 3-5 km, was die Versorgung mehrerer Fahrzeuge mit einem Funksignal einschränkt. Die Abspeicherung der genauen Aufstellposition ermöglicht eine hohe statische Genauigkeit, so dass die

Wiederholbarkeit der Messungen auf der bearbeiteten Fläche in Reichweite steigt. Dennoch können Positionsbestimmungen mit 2,5 cm absoluter Genauigkeit über mehrere Tage oder Monate nicht durchgeführt werden. Bei einer mobilen Station besteht eine erhöhte Diebstahlgefahr sowie die Gefahr einer möglichen Beschädigung durch Passanten oder Fahrzeuge.



Abb. 8: Mobile RTK-Station (Quelle: Trimble)

4.4.3 Netzwerk

Abhilfe für die nicht ausreichende Signalreichweite liefern mittlerweile deutschlandweit abdeckende RTK-Netzwerke, wie z.B. das Farm RTK oder das AgCelNet. Diese Netzwerke bestehen jeweils aus mehreren großen RTK-Referenzstationen, die in Abbildung 9 als RTK 1 bis RTK 4 gekennzeichnet sind und deren Daten über das Internet an einen zentralen Rechner, den Server, übertragen werden. Dieser empfängt die Position des RTK-Empfängers über Mobilfunk (GSM/GPRS), berechnet die Korrektur anhand der Daten von den verschiedenen Referenzstationen und sendet die korrigierte Position auf gleichem Datenweg an den Empfänger zurück. Die Reichweite der jeweiligen Referenzstation zum Empfänger ist ausschlaggebend für eine unterschiedliche Signalgewichtung bei Berechnung der Korrektur. Da die Korrekturdaten über das Internet zugänglich sind, kann ein am Internet angeschlossener Rechner die Daten abrufen und wie eine fest installierte

RTK-Referenzstation diese über ein Funkmodem in einem eingeschränkten Senderadius zur Verfügung stellen.

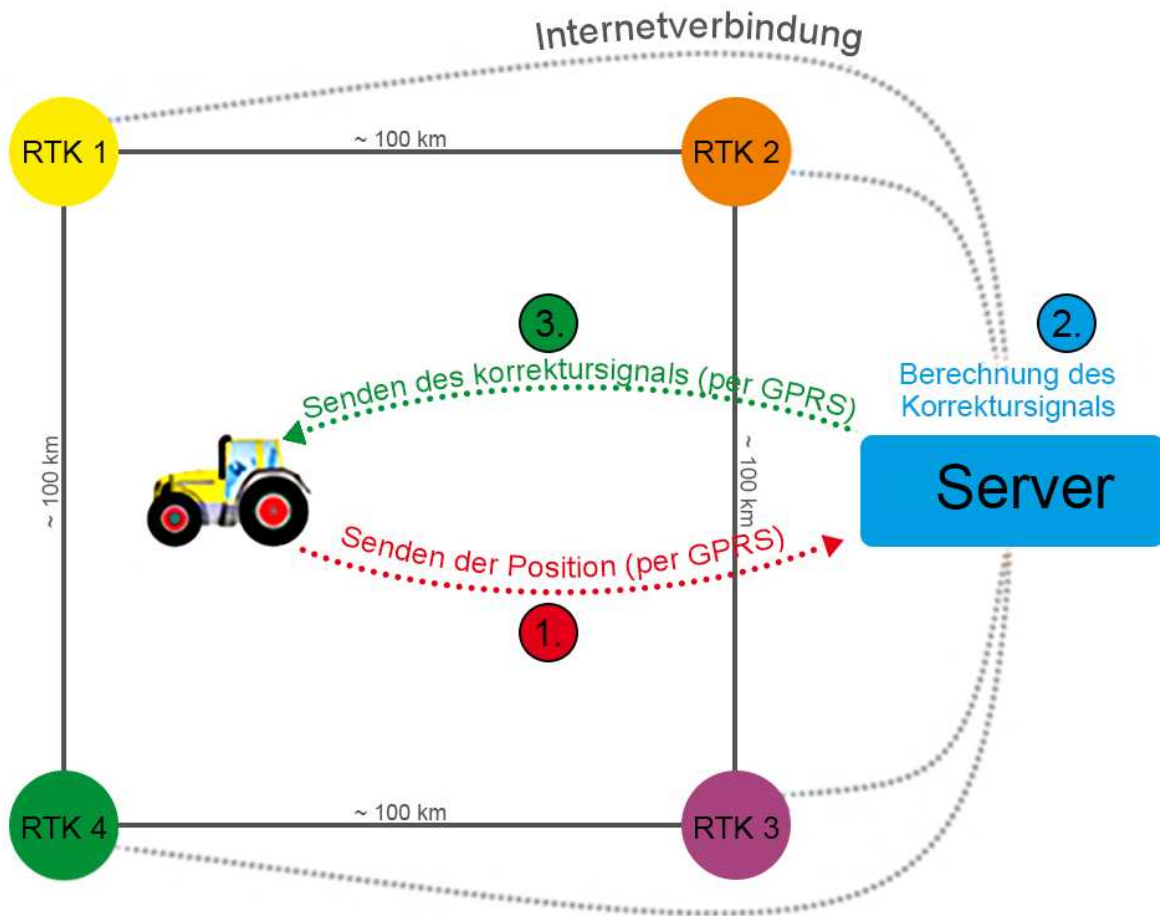


Abb. 9: RTK-Netzwerk mit Mobilfunkanbindung (Quelle: geo-konzept)

Die Genauigkeitskorrektur kann je nach Anbieter für unterschiedliche Zeiträume gemietet werden. Somit können auch kleinere oder mittlere Betriebe die Vorteile der höchsten Positionsgenauigkeit nutzen, ohne in die mobile oder stationäre Referenzstation investieren zu müssen. Die Kosten werden pro Empfänger verbucht.

Korrektureinschränkend sind einerseits die für die gesamte Parallelfahrt ungünstige Satellitenkonstellation und die dadurch fehlerhafte oder eingeschränkte Positionsortung sowie andererseits der schlechte Mobilfunkempfang, der den Korrekturdatentransfer verlangsamt oder unterbricht.

Tab. 3: Übersicht Korrektursignale (Quelle: geo-konzept, verändert)

	Korrektur L1	Korrektur L2	Genauigkeit Spur-zu-Spur	Absolute Genauigkeit
EGNOS/ WAAS/ MSAS	+		10-30 cm	1-2 m
Beacon (Küstenfunk)	+		15-30 cm	50-75 cm
Starfire 1	+		10-30 cm	50 cm
OmniSTAR HP/XP	+	+	5-10 cm	20 cm
Starfire 2	+	+	5-10 cm	20 cm
RTK	+	+	2,5 cm	2,5 cm

Die Tabelle zeigt die unterschiedlichen, auf dem Markt verfügbaren Korrektursignale mit ihren jeweiligen Signalfrequenzen und der Spur-zu-Spur- sowie absoluten Genauigkeit.

5. Anwendungsmöglichkeiten

Durch die zuverlässige und genaue Positionsbestimmung erschließen sich unterschiedliche Anwendungsmöglichkeiten für die landwirtschaftliche Praxis. Sie kann einerseits unterstützend als auch die Hauptaufgaben der Arbeit erledigen, um den Fokus auf Kontrolle und Übersicht zu legen. Die hohe Systemintegration des GPS-Systems in verschiedenen kommerziellen Bereichen führt zu einer hohen Signalgewährleistung, was einen Ausfall oder ein Abschalten des Systems nahezu ausschließt. Mit der Erweiterung durch weitere GNSS ist die bisherige Abhängigkeit zum amerikanischen GPS gesunken. Somit können komplette Arbeiten mit Hilfe satellitengestützter Positionsbestimmung durchgeführt werden. Im Folgenden sollen verschiedene Anwendungsbereiche beschrieben werden. Für diese werden in der Regel eine Antenne, ein Display und für komplexere Systeme verschiedene Rechensysteme, Modems und Sensoren benötigt.

5.1 Möglichkeiten der Parallelführung

Für die Praxis ergeben sich aus der zentimetergenauen Positionsbestimmung drei Varianten der Parallelführung. Diese arbeiten unabhängig von Sichtverhältnissen und Wetterbedingungen. Sie führen zu einer verbesserten Arbeitsqualität und steigern durch eine Minimierung von Überlappungen und Fehlstellen die Produktivität und Effizienz. Die bisherige Aufgabe der Maschinensteuerung durch Sichtkontakt auf das Anbaugerät entfällt für den Fahrer. Er wird dadurch entlastet und kann sich auf die

optimale Geräteeinstellung und die fortlaufende Kontrolle konzentrieren. Bedienungsfehler aufgrund abnehmender Konzentration oder schlechter Sichtverhältnisse werden minimiert.

5.1.1 Manuelle Parallelführungssysteme

Mit der manuellen Parallelfahrhilfe kann der Fahrer sein Gerät per Hand lenken. Ein Bildschirm oder ein Lichtbalken, wie auf Abbildung 10 dargestellt, zeigt ihm die Richtungskorrekturen an. In der Regel wird dieses System mit L1-korrigiertem GPS und ohne Hangausgleich eingesetzt. Daraus resultiert eine Genauigkeit von 10 bis 30 cm ohne den Fehler, der durch falsche oder verspätete Lenkbewegungen entsteht. Diese kostengünstige Einstiegslösung ist für Anwendungen ohne andere optische Markierungen, wie Spuranreißer und im Grünland geeignet. Darunter zählen z.B. die Ausbringung von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln. Durch Abbildung der bereits bearbeiteten Flächen auf dem Farbmonitor kann das System darüber hinaus das Einsetzen beim Spritzen oder Düngen erleichtern. Durch eine mit Magnetfuß befestigte Antenne und einer mit Saugnapf befestigten Anzeigeeinheit kann das System schnell zwischen verschiedenen Maschinen gewechselt werden. Manuelle Parallelführungssysteme sind in der Regel mit Zukauf eines Lenkmotors und eines Navigationsrechners zu einem Lenkassistenzsystem aufrüstbar.



Abb. 10: CFX-750 Bildschirm (Werkbild Trimble)

5.1.2 Lenkassistenzsysteme

Das Lenkassistenzsystem greift mit Hilfe eines Elektromotors (siehe Abbildung 11), von den Firmen Trimble und John Deere am Lenkrad oder an der Lenksäule in die Lenkung des Fahrzeugs ein. Das System kann dieses auf Spur halten, aber nicht aus jeder Lage selbstständig und in angemessener Geschwindigkeit auf die vorhergesehene Fahrspur lenken. Für die Aktivierung erfordert das Lenksystem in der Regel eine Mindestgeschwindigkeit von 2 km/h. Das System verfügt über einen Hangneigungsausgleich und kann mit dem RTK-Korrektursignal eine Genauigkeit von 5 cm erreichen. Preisliche Abstufungen sind hier mit anderen Korrekturen auf 10 cm sowie auf 10 bis 30 cm möglich. Ein Vorteil in der Praxis erschließt sich aus dem schnellen Umbau des Lenkmotors mit Anzeigeeinheit auf andere Fahrzeuge. Aufgrund der langsameren Regelgeschwindigkeit und der schlechteren Korrektur bei wechselnden Geländeeigenschaften ist das Assistenzsystem ungenauer als das automatische Lenksystem.



Abb. 11: EZ-Steer (Werkbild Trimble), Auto Trac 200 (Werkbild John Deere)

5.1.3 Automatische Lenksysteme

Das automatische Lenksystem ist vollständig in die Maschine integriert. Es greift in die Lenkhydraulik ein und kann somit schneller und genauer reagieren. Ein dreidimensional arbeitendes Lagereferenzsystem liefert Korrekturen für den Ausgleich von Roll-, Gier- und Nickbewegungen und optimiert die Genauigkeit bei unterschiedlichen Geländeeigenschaften, wie z.B. dem Hangeinsatz, auf ein Maximum. Es kann mit dem RTK-Korrektursignal bis zu 2,5 cm genau gearbeitet werden. Auch hier können weitere Genauigkeitsabstufungen vorgenommen werden. Eine Aktivierung kann auch bei Querstellung zur eigentlichen Fahrtrichtung, bei Rückwärtsfahrt und langsamen Geschwindigkeiten vorgenommen werden. Im Gegensatz zu den anderen Systemen bietet dieses eine automatische

Vorgewendeunterstützung an. Der Wendevorgang läuft ohne manuellen Eingriff ab. Unterschiedliche Lenkstrategien des Systems und der Einsatz von zwei Antennen in Kombination mit unterschiedlichen Sensoren führen zu einer vollen Ausnutzung der Arbeitsbreite.

5.2 Geländekompensation

Für das exakte Arbeiten ist nicht allein die Positionsbestimmung des GPS-Empfängers ausschlaggebend. Darüber hinaus ist eine Messung der verfälschten Position im Gelände für eine hohe Genauigkeit wichtig. Die Maschine muss durch eine künstliche Verschiebung der gemessenen Position auf der elektronischen Karte das Fahrzeug genau auf der Sollfahrspur halten. Sensoren messen den jeweiligen Fehler, welcher anschließend im dreidimensional arbeitenden Lagereferenzsystem dazu verwendet wird, die Korrekturgrößen zu errechnen. Diese teilen sich in drei verschiedene Korrekturbewegungen auf, die im Folgenden erklärt werden.

5.2.1 Bewegung um die Längsachse (Rollen)

Diese Korrekturbewegung ist notwendig, wenn die Maschine durch Seitenneigung am Hang oder durch seitliches Schaukeln bei unebenem Boden ihre gemessene Position verfälscht. Die Antenne wird demnach seitlich verschoben und kann bei starker Neigung zu einem Fehler von bis zu einem Meter führen. Dieser Effekt wird Rollen genannt.

5.2.2 Bewegung um die Querachse (Nicken)

Eine weitere Korrektur muss bei der Verfälschung der Position um die Querachse stattfinden. Diese entsteht bei der Fahrt am Längshang. Die meist auf dem Antennendach angebrachte Antenne wird bei Talfahrt nach vorne sowie bergauf nach hinten verschoben und führt somit zu Ungenauigkeiten. Die Spur-zu-Spur-Genauigkeit wird nicht beeinflusst und ist für Arbeiten wie den Stoppelbruch, ausgenommen das automatische Vorgewendemanagement, zu vernachlässigen. Bei der Steuerung von Feldspritzen, Sämaschinen oder Düngerstreuern anhand der gemessenen Position würde eine Berg- oder Talfahrt ohne die Korrektur der Nickbewegung zu verfrühten oder verspäteten Steuerbefehlen führen. Das hätte zur Folge, dass die, für eine Position berechnete Pflanzenschutzmittel-, Saat- oder Düngermenge bei Talfahrt zu früh und bei Bergfahrt verspätet ausgegeben werden.

5.2.3 Bewegung um die Hochachse (Gieren)

Die dritte Korrekturbewegung ist für einen Ausgleich von eventuellen Driftbewegungen nötig. Die Maschine dreht sich entlang seiner Hochachse und steht nicht mehr in Fahrtrichtung. Dieser Fehler entsteht an Seitenhängen, wenn das Anbaugerät das Heck der Zugmaschine bergab zieht. Ziel der Gierbewegung ist es nicht, die komplette Maschine in Fahrtrichtung zu stellen, sondern das Heck mit angebautem Gerät auf der Sollfahrspur zu halten, um eine volle Arbeitsbreite zu gewährleisten.

5.3 Steuerung des Anbaugerätes

Bei aufgesattelten Anbaugeräten ist es nicht möglich, durch die drei Sensoren auf der Zugmaschine den Drift des Geräts zu erfassen. Bei gleichbleibender seitlicher Hangneigung bleibt dieser konstant und gleicht dem der Zugmaschine. Beide unterliegen somit dem gleichen seitlichen Versatz und arbeiten spurgenaue. Soll die exakte Position des Anbaugerätes errechnet und entsprechend korrigiert werden, muss eine aktive oder passive Anbaugerätsteuerung sowie zusätzlich eine weitere Antenne ergänzt werden. Die Positionsbestimmung der zweiten Antenne steuert die Lenkung auf der Sollfahrspur. Die genauen Funktionen beider Systemlösungen sollen nachfolgend erläutert werden.

5.3.1 Passive Anbaugerätsteuerung

Für diese Steuerung ist eine zweite Antenne auf dem Anbaugerät montiert. Nach Eingabe der Geräteabmessung und der Position der Antenne auf dieser, wird das Zugfahrzeug so ausgerichtet, dass das Anbaugerät auf der Sollfahrspur gehalten wird. Im Gegensatz zur aktiven Steuerung kann auf eine Lenkhydraulik oder installierte Lenkung verzichtet werden, die bei größeren aufgesattelten Geräten nur schwer zu benutzen sind. Der Drift am seitlichen Hang kann bestmöglich kompensiert werden. Für Reihenkulturen und der Anwendung bei der Strip Tillage ist die Steuerung für aufgesattelte Kombinationen eher ungeeignet. Das Anbaugerät wird erst durch Korrekturbewegungen des Zugfahrzeugs auf die Sollspur gelenkt und kann somit nur mit zeitlichem Versatz auf den Fehler reagieren.

5.3.2 Aktive Anbaugerätesteuerung

Bei der aktiven Anbaugerätesteuerung sind neben zwei Antennen eine aktive hydraulische Steuerung oder ein Verschieberahmen notwendig. Das Anbaugerät kann am seitlichen Hang oder in Kurven zentimetergenau den Reihen, den bearbeiten Streifen oder Dämmen folgen. Ein hydraulisches Steuerventil korrigiert durch eine gelenkte Achse oder Scheibenseche die Position. Ein zwischen Anbaugerät und Zugmaschine gesetzter GPS-gestützter Verschieberahmen kann in einem Winkel von etwa 15° die Lenkbewegungen ausgleichen und das Gerät auf der Sollspur halten. Neben der Variante mit nur einer Antenne auf dem Anbaugerät kann mit zwei Antennen die Sollfahrspur vom Gerät als auch vom Zugfahrzeug eingehalten werden. Der Rahmen kann ohne eine Veränderung am Anbaugerät umgebaut und somit wirtschaftlicher eingesetzt werden. Mit der hydraulischen Lenkung oder dem Verschieberahmen in Kombination mit satellitengestützter Positionsbestimmung kann effektiver, zuverlässiger und mit höherer Arbeitsqualität sehr genau gearbeitet werden, die durch manuelle Fahrstrategien nicht konstant erreicht wird. Anwendung findet diese Steuerung in der Unkrautbekämpfung von Reihenkulturen, der Aussaat von Sonderkulturen, dem Gemüseanbau als auch beim Anlegen von Dämmen für z.B. den Kartoffel- oder Spargelanbau. Es kann demnach mit den Hackscharen ohne Beschädigung näher an der Pflanze gearbeitet, der Pflanzenabstand bei der Aussaat exakter eingehalten und Dämme optimaler aufgehäuft werden.

5.4 Fahrstrategien

Für unterschiedliche Einsatzbedingungen des Parallelfahrsystems ist eine große Auswahl an Fahrstrategien erforderlich, um die zu bearbeitende Fläche optimal mit wenig Überlappung und minimalem Aussetzen des Anbaugerätes zu befahren.

Bei der auf Abbildung 12 dargestellten AB-Linie setzt der Fahrer einen Punkt A und in mindestens 50 m Abstand einen zweiten Punkt B. Daraufhin legt das System eine, über beide Punkte hinausgehende Referenzlinie sowie auf der rechten und linken Seite weitere Linien mit dem Abstand der vorher eingegebenen Arbeitsbreite an. Somit kann der Fahrer bei einer beliebigen Referenzlinie einsetzen und entlang dieser arbeiten. Ist das Vorgewende vorher abgefahren und eingespeichert worden, gibt das System ein akustisches Signal beim Erreichen dieser. Durch die optimale Anwendung sollen Wendevorgänge um 35 % beschleunigt und die Vorgewendegröße um 30 % verringert werden.

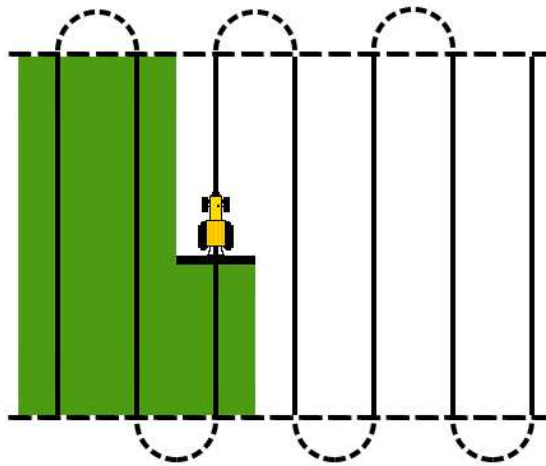


Abb. 12: AB-Linie (Trimble)

Die Fahrstrategie der A+ Linie auf Abbildung 13 erfordert eine Winkelangabe des Fahrers. Es wird lediglich ein Punkt gesetzt und mit entsprechendem Winkel die Referenzlinie gelegt. Auch hier werden mit dem Abstand der Arbeitsbreite weitere Leitlinien gesetzt. Eine A+ Linie ist gegenüber einer AB-Linie bei einem Versatz durch längere Pause und dem daraus resultierenden Positionsdrift von Vorteil. Das Zugfahrzeug wird an der letzten Fahrspur ausgerichtet und es kann mit gleichem Winkel weitergearbeitet werden.

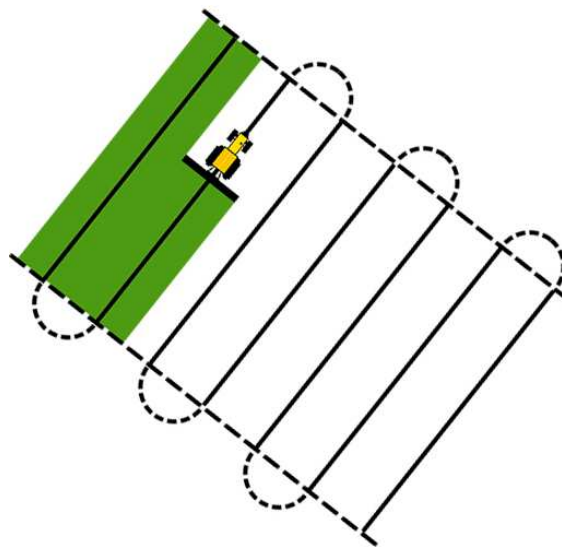


Abb. 13: A+ Linie (Trimble)

Falls es der zu bearbeitende Schlag nicht zulässt, eine gerade Referenzlinie zu setzen, kann mit der adaptiven Kurve, wie auf Abbildung 14 zu erkennen, ein Spurmuster gelegt werden. Das Zugfahrzeug lenkt entlang der zuletzt gefahrenen Fahrspur. Diese ist aufgrund von lokalen Hindernissen, wie z.B. Gewässern, Strommasten oder Bäumen gegenüber der ursprünglich gefahrenen AB- oder A+ Linie verändert.

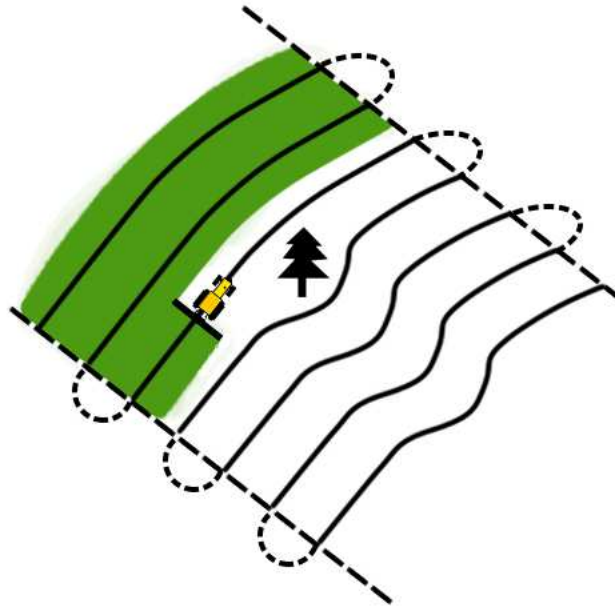


Abb. 14: Adaptive Kurve (Trimble)

Genau wie bei der adaptiven Kurve kann mit der identischen Kurve, wie auf Abbildung 15 dargestellt, ein Spurmuster an die Feldkonturen angepasst werden. Jedoch bleibt hier die zuerst festgelegte Referenzlinie erhalten, sodass diese Fahrstrategie für einmaliges Umfahren von Hindernissen ausgelegt ist. Aufgrund der unveränderten AB- oder A+ Linie können beliebig viele Fahrspuren für die optimale Bearbeitung ausgelassen werden.

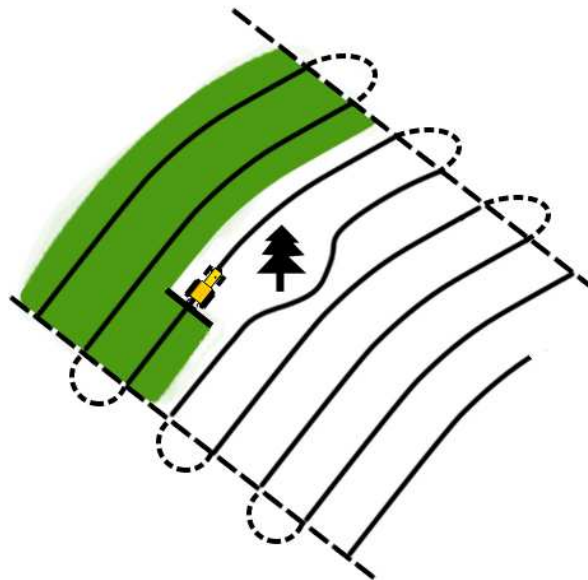


Abb. 15: Identische Kurve (Trimble)

Bei der automatischen Vorgewendebearbeitung auf Abbildung 16 muss vor dem Beginn die gewünschte Anzahl an Spuren am Vorgewende eingegeben werden. Daraufhin kann nach einmaliger Umfahrt des Feldes und dem Anlegen einer entsprechenden Referenzlinie das Lenksystem bereits in der zweiten Fahrspur des Vorgewendes, sofern vorher eingegeben, aktiviert werden. Parallel zur ersten Umfahrt legt das System eine gerade Referenzfahrspur im Abstand zur Arbeitsbreite an und erkennt das Ende der letzten Vorgewendenumfahrt, um im Anschluss in die errechnete AB-Linie einzufahren. Beim Erreichen des Vorgewendes gibt das System eine Warnung aus, um das Anbaugerät auszuheben oder es auszuschalten. Ein weiterer Vorteil ist die automatische Berechnung der Schlaggröße.

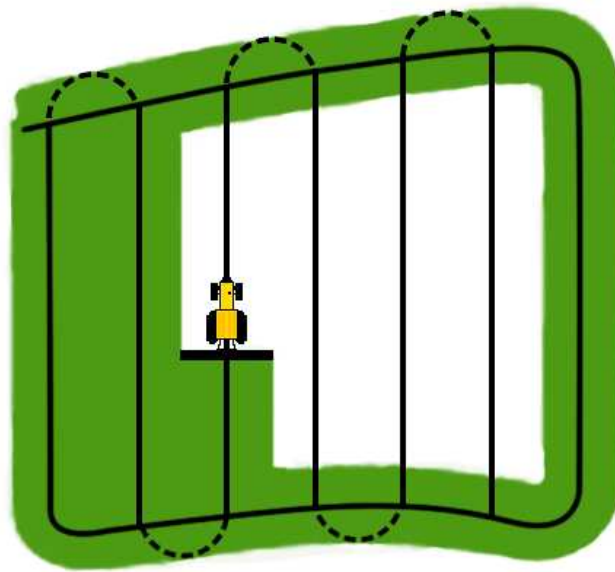


Abb. 16: Automatische Vorgewendebearbeitung (Trimble)

Die auf Abbildung 17 dargestellte Kreisbahn wird vor allem bei der Bearbeitung von Flächen mit Kreisberegnern eingesetzt. Mit festgelegter Entfernung wird kreisförmig zur Mitte hin gearbeitet. Pflanzenschutzmittel- sowie Düngerkonzentrationen werden bei der Ausbringung zur Mitte hin höher. Bei großen Arbeitsbreiten wird dieser Effekt verstärkt, da die Differenz zwischen den Abständen der linken und rechten Gerätekannte zur Kreismitte steigt.

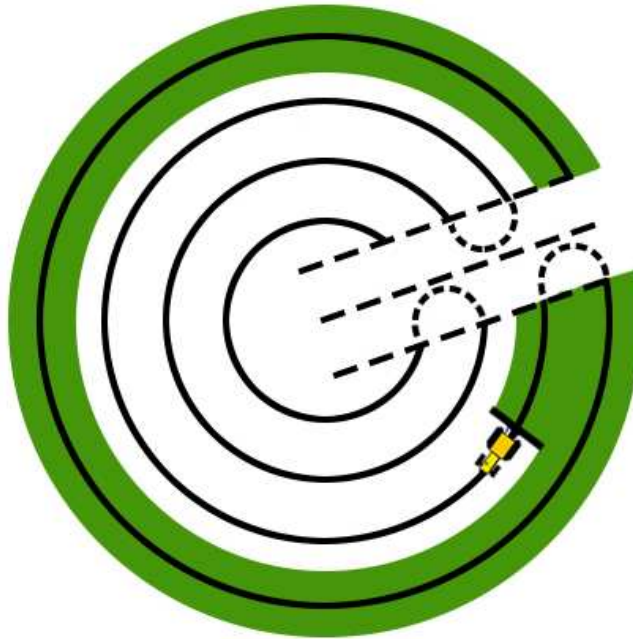


Abb. 17: Kreisbahn (Trimble)

Mit der FreeForm Fahrstrategie auf Abbildung 18 wird dem Fahrer die Möglichkeit gegeben, auf einem Feld mehrere Referenzlinien anzulegen und gleichzeitig darstellen zu lassen. Dies steigert die Effektivität bei der Bearbeitung von verwinkelten und mit vielen lokalen Hindernissen bestückten Stücken. Das System nutzt automatisch die der Position aktuell am nächsten liegende Referenzlinie. Diese kann aber durch Knopfdruck vom Fahrer manuell gewechselt werden.

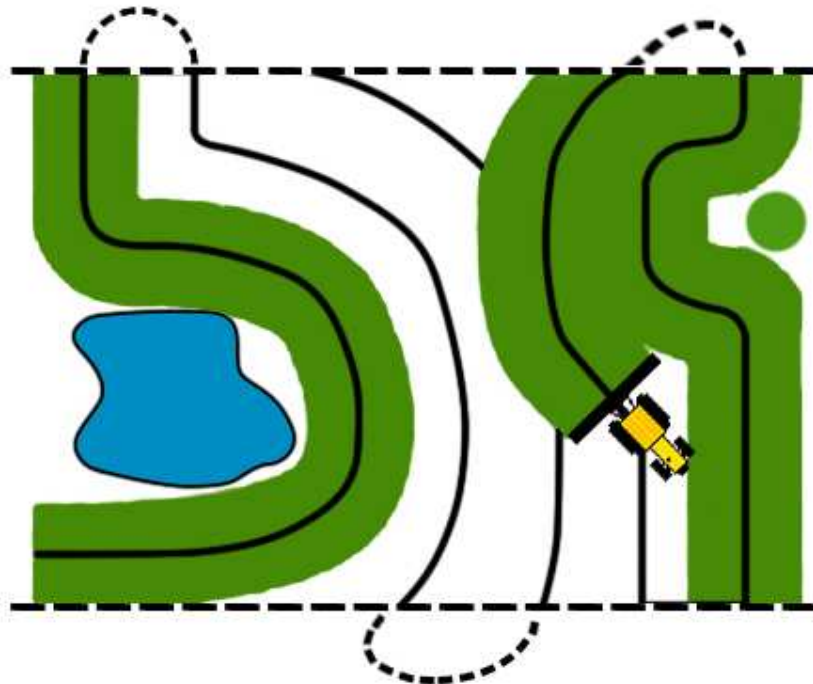


Abb. 18: FreeForm (Trimble)

5.5 Precision Farming

Die genaue Dokumentation und Bedarfsplanung sowie die teilflächenspezifische Bearbeitung aus der Kombination mehrerer moderner Systeme und Verfahrenstechnologien wie der GPS-Technik für die exakte Positionsbestimmung, des Sensoreinsatzes für eine Analyse des Bestandes oder der Bodenkrume und der GIS-Technologie für die Auswertung und Visualisierung gespeicherter Parameter, mit dem Ziel einer effektiveren Produktion, heißt fachsprachlich Precision Farming. Diese gezielte Landbewirtschaftung geht über das bisher beschriebene parallele Fahren hinaus. Für eine gleichzeitig gewinnbringende und dennoch nachhaltige Nutzung der bewirtschafteten Fläche müssen Schlaginformationen gesammelt und verarbeitet werden. Das Datenmanagement und die gezielten Maßnahmen im Bereich der Aussaat, der Düngung sowie des Pflanzenschutzes sind von großer Bedeutung. Aufgrund steigender Qualitätskontrollen und der Forderung nach mehr Transparenz im Bereich der Lebensmittelindustrie, kann durch diese Technologie der Produktionsverlauf lückenlos dokumentiert und Rückschlüsse getroffen werden. Aktuelle Daten über die Ausbringung von Betriebsmitteln können außerdem direkt an den Hauptrechner geschickt und verarbeitet werden.

5.5.1 Controlled Traffic Farming (Regelfahrspurverfahren)

Beim Regelfahrspurverfahren wird mit Hilfe von RTK das Feld in befahrene und unbefahrene Zonen unterteilt. Fahrspuren werden am Computer geplant und anschließend mit hoher Genauigkeit abgefahren. Das RTK-Korrektursignal mit einer absoluten Genauigkeit von 2,5 cm gewährleistet über Jahre gleichbleibende Fahrspuren, die dadurch systematisch verdichtet werden. Dies führt zu einer verbesserten Befahrbarkeit nach starken Niederschlägen und daraus resultierenden verringerten Terminkosten. Die Bodenverdichtung wird auf dem restlichen Schlag verringert und soll, aufgrund verbesserter Wachstumsbedingungen sowie reduziertem Zugwiderstand bei der Bodenbearbeitung, zu einer Ertragssteigerung von bis zu 10 % und einer Verringerung des Zugwiderstandes in den unbefahrenen Zwischenräumen um 15 % führen.

5.5.2 Strip Tillage (streifenweise Bearbeitung)

Unter Strip Tillage versteht man eine Kombination aus Mulch- und Direktsaat. Durch streifenweise Auflockerung des Bodens wird in diesen nur minimal eingegriffen. Nach der Ausbringung eines Düngerbandes wird anschließend das Saatgut im Frühjahr abgelegt. Die restliche unbearbeitete Bodenoberfläche profitiert durch Pflanzenreste einer Zwischen- oder Vorfrucht von einer besseren Bodengare, einer geringeren

Erosionsanfälligkeit sowie einem Schutz vor Verschlammung. Durch streifenweise Bearbeitung wird der Zugkraftbedarf reduziert und Treibstoff eingespart. Das Verfahren setzt eine hohe Wiederholbarkeit der Positionsmessungen voraus, so dass einzig das RTK-Korrektursignal dafür geeignet ist. Die Anbaugeräte müssen, nach der Depotdüngung im Herbst, im Frühjahr wiederholbar auf derselben Fahrspur das Saatgut ablegen.

5.5.3 Automatische Teilbreitenschaltung

Bei enger Kurvenfahrt, bei Keilen und am Vorgewende entstehen bei der Pflanzenschutzspritze, dem pneumatischen Düngerstreuer oder der Drillmaschine Überlappungen. Unterschiedliche Hersteller bieten Lösungen zur automatischen, satellitengestützten Teilbreitenschaltung an. Aufgrund der bekannten Position sowie den abgespeicherten Abmessungen des Anbaugeräts kann das System rechtzeitig die einzelnen Teilbreiten oder Säaggregate abschalten, wie auf Abbildung 19 ersichtlich. Besonders bei der Einzelkornsaat von Mais und Zuckerrüben können die einzelnen Reihen zentimetergenau abgeschaltet, Überlappungen vermieden und teures Saatgut eingespart werden.

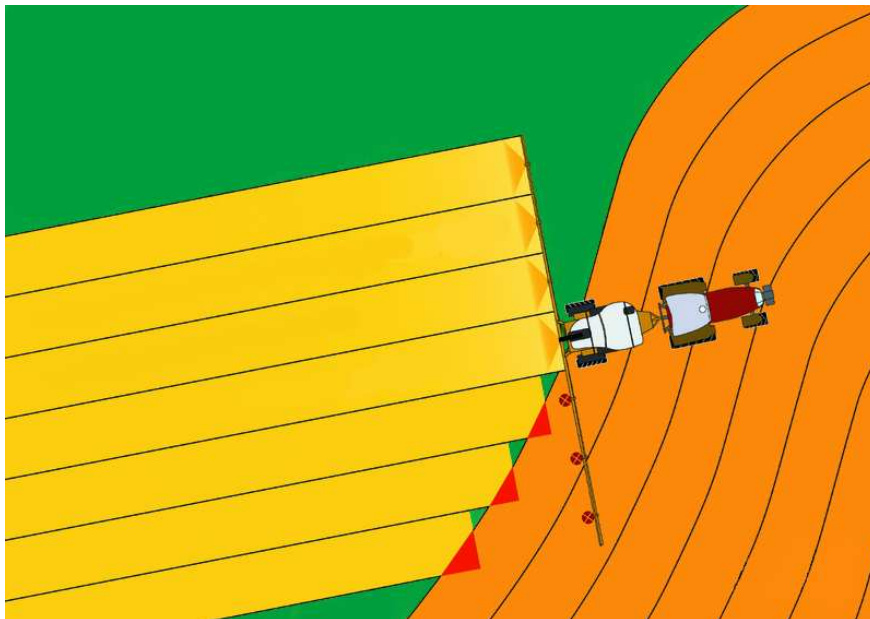


Abb. 19: Automatische Teilbreitenschaltung (Werkbild agricon, verändert)

Abbildung 20 zeigt das zentimetergenaue Aussetzen der einzelnen Säaggregate am Vorgewende. Für verschiedene Anwendungen ist der unterschiedliche Grad der Überlappung ausschlaggebend. Bei der Ausbringung von Wachstumsreglern oder Stickstoffdüngern sollte eine Überlappung vermieden werden, wohingegen bei Herbizid- oder Fungizidmaßnahmen jegliche Fehlstellen ausgeschlossen werden müssen.



Abb. 20: Teilbreitenschaltung bei Einzelkornsaat (John Deere)

Da das Vorgewende bei der Getreideaussaat in der Regel zum Schluss bestellt wird, kann durch einmaliges Umfahren die Feldgrenze erfasst und dementsprechend das Vorgewende virtuell erstellt werden. Anschließend kann mit manuell gewählter Fahrstrategie die Fläche bearbeitet werden. Mit der automatischen Vorgewendebearbeitung kann das Vorgewende, je nach Anforderung, auch am Anfang der Aussaat bestellt werden.

Besonders Pflanzenschutzspritzen und pneumatische Düngerstreuer überlappen bei Kurvenfahrten durch Zurückschlagen der Gestänge auf der Innenseite. Hier muss das intelligente System frühzeitig mit Hilfe der Geschwindigkeit und der zu erwartenden Überlappung die Abschaltung der einzelnen Teilbreiten errechnen. Durch die minimierte doppelte Bearbeitung in Kurvenfahrt, Keilen und am Vorgewende können bis zu 10 % Betriebsmittel eingespart werden.

5.5.4 Teilflächenspezifische Düngung

Diese Form der Düngung gilt als wichtigster Bestandteil des Precision Farmings. Gegenüber der bisherigen Praxis unterscheidet sich die teilflächenspezifische Düngung darin, dass über Applikationskarten verschiedene Wachstums- und Bodenunterschiede des Feldes in die auszubringende Menge korrigierend einfließen. Es ist mittlerweile nötig, eine Differenzierung des Feldes in verschiedene Parzellen vorzunehmen, um der N-Versorgung angepasst zu düngen. Die herkömmliche

einheitliche Düngung und der gleichzeitige Nährstoffentzug durch die Nutzpflanze führen zu einer immer größer werdenden heterogenen Nährstoffverteilung auf einem Schlag.

Bereits vorhandene Daten der Reichsbodenschätzung, des Bodenscanners, wie auf Abbildung 21 als Leitfähigkeitskarte dargestellt oder durch genommene Bodenproben können den Schlag in verschiedene Qualitäten einteilen, um generelle Ertragspotentiale zu definieren. Darüber hinaus können gemessene Ertragsdaten vom Mähdrescher, siehe Abbildung 22, ausgewertet und mit den ausgebrachten Düngermengen verglichen werden, um daraus Schlussfolgerungen für unterschiedliche Erträge durch variable Düngermengen zu ziehen.

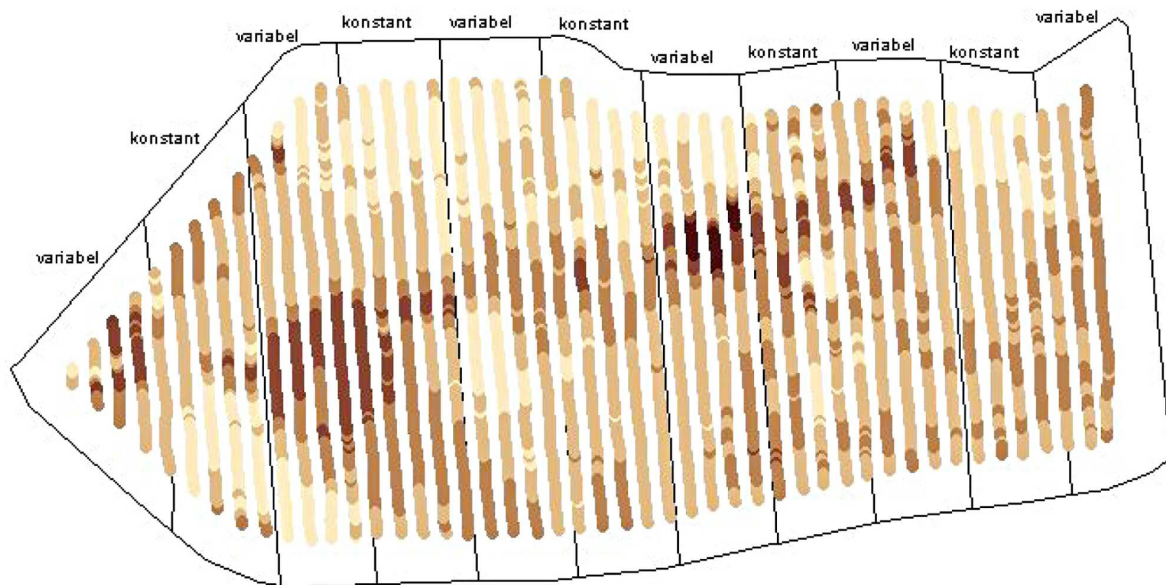


Abb. 21: Leitfähigkeitskarte (Agricon)

Die Abbildungen 21 und 22 der Firma Agricon zeigen das Verhältnis zwischen variabler und konstanter N-Düngung. Eine Verarbeitung aller gemessenen Daten findet in der Regel mit einem entsprechenden Flächenmanagementprogramm statt. Hierfür gibt es auf dem Markt unterschiedliche Herstellerlösungen.

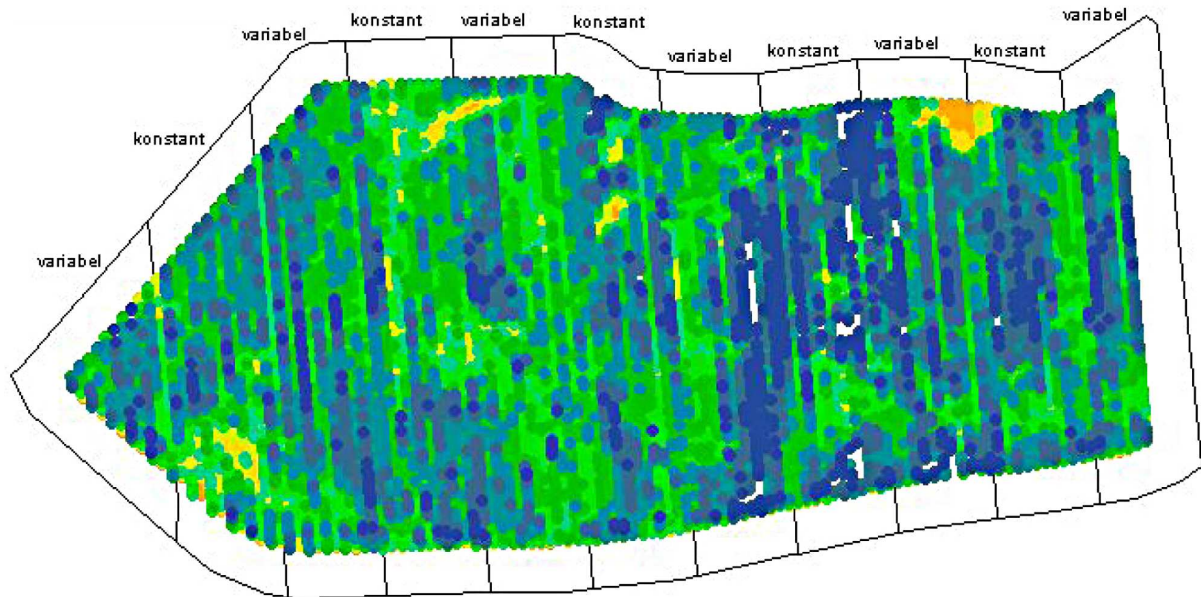


Abb. 22: Ertragskarte (agrimon)

Die teilflächenpezifische Düngung kann in zwei verschiedene Verfahren unterteilt werden, die mit unterschiedlichen Prinzipien funktionieren und im Folgenden erklärt werden. Voraussetzung für die Düngung ist eine variable Streutechnik, die während der Fahrt entsprechend den Richtwerten die Düngermenge variieren kann.

5.5.4.1.1 Offline-Verfahren

Dieses Verfahren umfasst die Erstellung einer Applikationskarte vor der eigentlichen Düngung. Am Computer wird das Feld in einzelne Quadrate mit unterschiedlichen Düngemengen eingeteilt. Diese Standortkarte wird vom Jobrechner des Düngerstreuers mittels Positionsbestimmung durch den GPS-Empfänger abgearbeitet. Anwendung findet dieses Verfahren bei der Grundnährstoffdüngung oder der Aussaat. Neben Nährstoffverteilungskarten durch Bodenproben, Leitfähigkeitskarten durch den Bodenscanner, Bodenkarten der Reichsbodenschätzung und Ertragskarten vom Mähdrescher müssen Geländeformen und die Erfahrungen des Landwirtes in die Applikationskartenerstellung mit einbezogen werden.

5.5.4.1.2 Online-Verfahren

Bei diesem Verfahren werden verschiedene Pflanzensensoren eingesetzt, die den Pflanzenbestand während der Fahrt beurteilen und dadurch die Ausbringmenge am Düngerstreuer steuern. Aktive Systeme messen mit eigener Lichtquelle den Stickstoffversorgungsgrad des Bestandes durch Reflektion in einem repräsentativen Feld links und rechts vom Sensor. Sie können unabhängig von der Tageszeit eingesetzt werden. Passive Systeme sind zur Messung der Reflektion hingegen auf ausreichendes Tageslicht angewiesen. Die GPS-Ausstattung ist für das Online-Verfahren grundsätzlich nicht erforderlich, muss allerdings für die Aufzeichnung der ausgebrachten N-Menge als Applikationskarte verwendet werden. Für eine variable Düngung muss ein ausreichender Pflanzenbestand vorhanden sein. Somit entfällt dieses Verfahren für die erste Düngergabe, da aufgrund einer fehlenden Mindestbodenbedeckung das Licht am Boden reflektiert wird. In der Regel kann das Online-Verfahren ab dem Ende der Bestockung (EC 29) eingesetzt werden.

5.6 Fahrzeuglogistik

Die satellitengestützte Positionsbestimmung kann neben dem Einsatz auf dem Acker auch als Informationsdienst zwischen Maschine und Büro dienen. Betriebe mit großem Maschinenpark und an mehreren Standorten verteilt bewirtschafteten Flächen, wie z.B. Lohnunternehmer, müssen für eine sinnvolle Einsatzplanung die Übersicht über den aktuellen Stand der Arbeiten behalten. Aufträge und Applikationskarten können ohne Umweg schnell an die Maschine gesendet und abgearbeitet werden. Dadurch können Wegzeiten und Betriebsmittel eingespart werden. Ein ortsunkundiger Fahrer findet durch integrierte Navigation auf schnellstem Weg zum Feld und Abfahrtespanne können zur aktuellen Position des Häckslers koordiniert werden. In Verbindung mit der Einspeisung von Wiegezetteln bei der Getreideernte oder der Auftragsarbeit für Biogasanlagen kann der Ertrag kilogrammgenau erfasst werden. Darüber hinaus kann vom Büro aus die Position des Fahrzeuges aufgezeichnet werden, was zur Transparenz und möglicher Optimierung von Aufträgen führt. Für eine einfache Positionsübermittlung reicht ein einfacher GPS-Datenlogger, der bei Stillstand der Maschine als Diebstahlschutz dienen kann. Bewegt sich der Logger, wird der Besitzer über z.B. SMS benachrichtigt. Für eine Nutzung von Maschinendaten während der Arbeit muss das GPS-System in die Fahrzeugelektronik integriert sein.

6. Betriebswirtschaftliche Betrachtung

Neben der Fahrerentlastung und einer folglich besseren Überwachung und kontinuierlichen Einstellung des Anbaugerätes führt der Einsatz von satellitengestützter Positionsbestimmung zu einer effektiveren Feldbewirtschaftung durch Verminderung von Fehlstellen bei der Grundbodenbearbeitung, der Aussaat sowie der Ausbringung von Dünger und Pflanzenschutzmitteln. Erträge können gesteigert, Mindererträge durch mehrfache Behandlung nahezu ausgeschlossen, der Boden nachhaltig bewirtschaftet und Betriebsmittel eingespart werden. Mit dem Controlled Traffic Farming wird dem Anwender die Möglichkeit gegeben, Fahrgassen zentimetergenau anzulegen und bei folgenden Überfahrten Fehlstellen zu minimieren. Durch hohe Genauigkeiten können Überlappungen bei der Bodenbearbeitung verhindert werden und auch bei schlechten Sichtbedingungen ist der Maschineneinsatz mit konstant hoher Qualität möglich. Der Einsatz des Gerätes wird somit auch nachts nahezu uneingeschränkt möglich.

Für eine betriebswirtschaftliche Betrachtung sind nicht alle Faktoren monetär greifbar. So ist z.B. die Entlastung des Fahrers von entscheidender Bedeutung, kann aber schlecht in Zahlen berechnet werden. Einzig die Folge einer besseren Überwachung des Anbaugerätes und dem daraus resultierenden frühzeitigen Erkennen von Fehlfunktionen kann die Standzeit erhöhen und Kosten einsparen.

Durch Untersuchungen aus den letzten Jahren können Einstufungen über die Rentabilität der entsprechenden Lenksysteme sowie des notwendigen Korrektursignals gegeben werden. Die Firma geo-konzept veranschaulichte die errechneten Werte der Korrektursignaluntersuchung in einem entsprechenden Diagramm, die nachfolgend zusammen mit einem, durch selbige Firma optimierten Diagramm der TU M.-W. abgebildet sind.

6.1 Überlappungen und Fehlstellen

In der Praxis führen verschiedene Einflüsse zu einer fehlerhaften Bearbeitung des Bodens. Neben der körperlichen Verfassung und dem Geschick des Fahrers führen die Arbeitsbreite, die gefahrene Geschwindigkeit und die entsprechenden Sichtverhältnisse zu Überlappung und dementsprechend zu einer ineffektiven Auslastung des Anbaugerätes. Parallelfahrssysteme sollen hier aushelfen, die Arbeit übernehmen und konstant eine hohe Genauigkeit gewährleisten. Aus einer Untersuchung von Zier und Wagner der Universität Halle aus dem Jahr 2008 über den Überlappungsgrad bei Feldarbeiten ergaben sich folgende Werte:

Die Überlappung bei der Bodenbearbeitung (z.B. Grubbern) lag bei 5-10 %. Bei Anwendungen ohne Fahrgassen lag die Überlappung bei ca. 20 %. Beim Anlegen von Fahrgassen entstand eine Überlappung von etwa 3,4 %.

Unterschiedliche Korrekturdatendienste bieten gegen Aufpreis Genauigkeiten bis zu 2,5 cm an. Nicht jedes Lenksystem mit entsprechendem Korrektursignal ist für jede Arbeitsbreite geeignet. Das nachfolgende, von geo-konzept erstellte Diagramm auf Abbildung 23 gibt das Verhältnis der Überlappung zur verwendeten Arbeitsbreite des Gerätes mit entsprechend genutztem Korrektursignal an. Für die Parallelführung wurde das automatische Lenksystem der Firma Trimble genutzt. Die rote Linie zeigt die Überlappungshöhe bei manueller Fahrt ohne den Einsatz von GPS-Technik. Die jeweils gestrichelten, senkrechten Linien schneiden die rote Linie in jeweils der Arbeitsbreitengröße, bei der sich die Anwendung des entsprechenden Korrektursignals lohnt. Die RTK Genauigkeit führt mit 2,5 cm bei allen Arbeitsbreiten zu weniger Überlappung gegenüber der manuellen Fahrt. Unter den Begriff DGPS fallen das deutschlandweit zu empfangene, kostenlose Korrektursignal Beacon sowie das europaweite SBAS-System EGNOS.

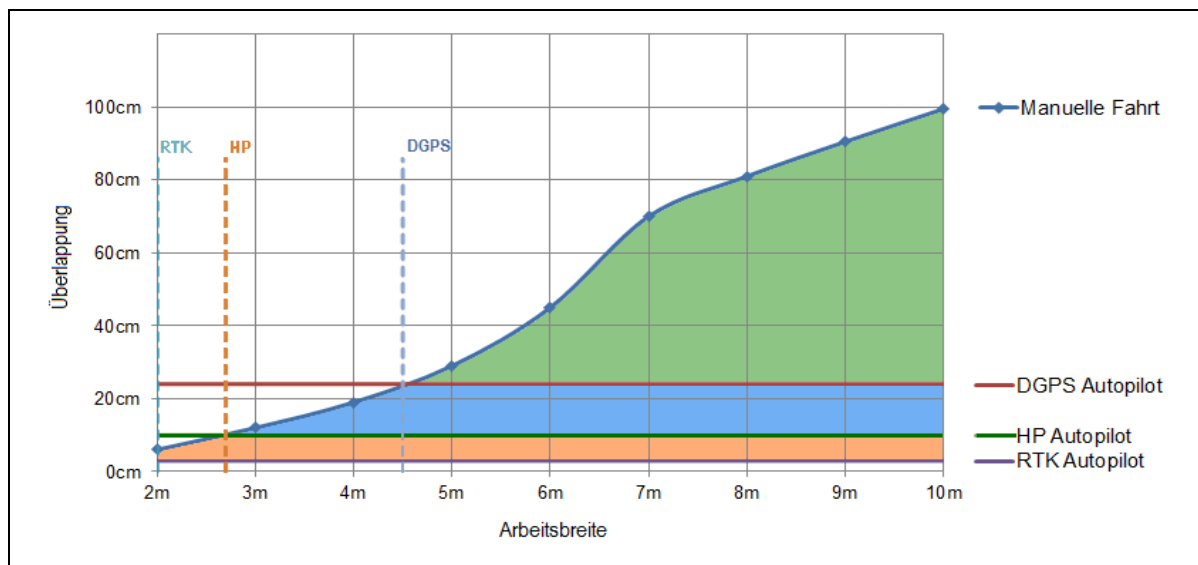


Abb. 23: Verhältnis der Überlappung zur verwendeten Arbeitsbreite (Quelle: geo-konzept, verändert)

6.2 Wirtschaftlichkeit

Aus einer Untersuchung der TU-München-Weihenstephan aus dem Jahr 2008 entstand folgendes, auf Abbildung 24 dargestelltes und durch geo-konzept verändertes Diagramm über die Wirtschaftlichkeit von Parallelfahrssystemen am Beispiel des Winterweizenanbaus nach Frank. Mit der Grundlage von 5 % Überlappung ohne den Einsatz eines Lenksystems, bei Arbeitsbreiten von 6 m bei

der Grundbodenbearbeitung und der Aussaat sowie 36 m beim Pflanzenschutz und der Düngung liegt das Einsparungspotential beim Winterweizenanbau bei 27 €/ ha. Die jährlichen Kosten setzen sich in der Untersuchung nach Frank aus den AfA-Kosten, dem Zinsaufwand sowie aus den laufenden Reparatur- und Korrekturdienstkosten zusammen. Die jährlichen Reparaturkosten setzt er mit 3 % des Investitionsbedarfes an, welcher für das jeweilige Lenksystem eine Trimble-Preisliste aus dem Jahr 2007 zu Grunde liegt. Bei einer Abschreibungsdauer von sechs Jahren ergeben sich demnach jährliche Kosten zwischen 3.800 €/ Jahr und 8.300 €/ Jahr.

Die Rentabilität eines Lenksystems hängt von den Faktoren der Investitionshöhe inklusive laufenden Kosten sowie der Einsatzfläche des Betriebes und dem damit einhergehenden Einsparpotential ab. Ab einer Einsatzfläche von 120 ha kann demnach ein Lenksystem mit einer Spur-zu-Spur-Genauigkeit zwischen 10 bis 30 cm wirtschaftlich sein. Eine Verwendung des hochgenauen RTK-Korrektursignals als Netzwerklizenz kann sich ab einer Fläche von 180 ha rechnen.

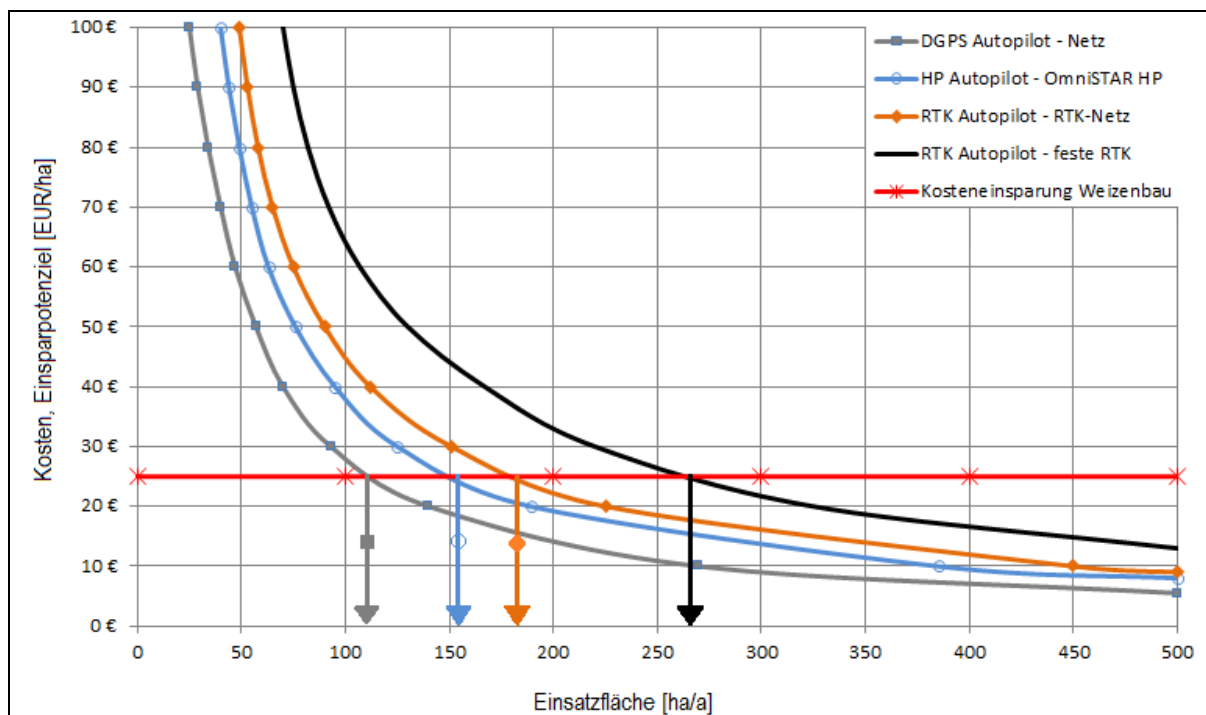


Abb. 24: Wirtschaftlichkeit von Parallelfahrssystemen am Beispiel des Winterweizenanbaus nach Frank (2008) (Quelle: geo-konzept, verändert)

Die Untersuchung nach Frank analysierte einzig den Anbau von Winterweizen. Weitere Getreidesorten, Raps oder Reihenfrüchte wie z.B. Mais müssen für eine Vollkostenrechnung des Betriebes mit einbezogen werden. Folglich kann sich der Einsatz eines Lenksystems bei geringerer Betriebsgröße rentieren. Darüber hinaus müssen die nicht weiter in der Untersuchung betrachteten Faktoren der Arbeitsentlastung des Fahrers, den verringerten Terminkosten sowie der

gestiegenen Effektivität und der damit einhergehenden erhöhten Schlagkraft in einer Bewertung für die Investition in ein Lenksystem bedacht werden.

7. Fazit

Das satellitengestützte Arbeiten ist aus der modernen Landwirtschaft nicht mehr wegzudenken. Aufgrund steigender Konkurrenz auf dem Markt sinkt der Produktpreis und Einstiegs-Parallelfahrssysteme werden für den kleinen und mittelgroßen Landwirt rentabel. Das effektivere und termingerechtere Arbeiten spart Betriebsmittel sowie Arbeitszeit ein. Durch zentimetergenaue Positionierung, kann bei Arbeitsspitzen in gleichbleibender Qualität und erhöhter Schlagkraft gearbeitet werden. Aufgrund der Wiederholbarkeit bei Messungen mit RTK-Genauigkeit sind Fahrgassen oder Versuchspartzellen permanent kartiert und für weitere Anwendungen im Bestand über Jahre abrufbar. Eine lückenlose, digitale Dokumentation betrieblicher Abläufe kann Fehler aufdecken und durch Transparenz dem Anwender Gewinnvorteile bringen. Die Vernetzung unterschiedlicher Systeme, wie z.B. die Sensortechnik oder der automatische Versand verschiedener Parameter, führt in Verbindung mit benutzerangepasster und praxisnaher Software zu einer standortunabhängigen Auftragsplanung. Zukünftig wird die Nachfrage nach satellitengestützten Anwendungen in der Landwirtschaft steigen. Mit zunehmender Technikaffinität werden moderne, preiswerte Systeme für bisher ungeeignete Betriebe lukrativer.

8. Literaturverzeichnis

Frank, H. Gandorfer, M. Noack, P.D.: „Ökonomische Bewertung von Parallelfahr-systemen“, TU München-Weihenstephan,
http://www.gil.de/dokumente/berichte/DDD/R20_2008_010.pdf

geo-konzept: „Leitfaden für GPS und Parallelführung“

Reckleben, Y.: Abschlussbericht „Entwicklung und Errichtung eines RTK-Netzwerkes in Schleswig-Holstein zur hochgenauen Positionsbestimmung und der Anwendung bei der bedarfsgerechten, teilflächenspezifischen Bewirtschaftung (Precision Farming).“ Projekt Nr.: 122-08-015, Fachhochschule Kiel

www.agricon.de: Informationen über GPS und Sensortechnik

www.geo-konzept.de: Informationen über verschiedene Gebiete der GPS - Technik

www.kowoma.de: Grundlagen und weiterführende Informationen über GPS

9. Abkürzungsverzeichnis

2RMS	Wahrscheinlichkeit von 95 %
A-GPS	Assisted Global Positioning System
ASTRA	Satellitenbetreiber für geostationäre Rundfunk- und Nachrichtensatelliten
CEP	Wahrscheinlichkeit von 50 %
DGPS	Differential Global Positioning System
DOP-Wert	Dilution of precision (Wert für Verschlechterung der Genauigkeit)
EC	Wachstumsstadien von Nutzpflanzen
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service (satellitengestützter Korrekturdienst der EU)
GIS	Geoinformationssystem
GLONASS	Globalnaja nawigazionnaja sputnikowaja sistema (russisches Navigationssatellitensystem)
GNSS	Globale Navigations Satelliten Systeme
GPRS	General Packet Radio Service (paketorientierter Dienst zur Datenübertragung in GSM-Netzen)
GPS	Global Positioning System (Globales Positionsbestimmungssystem)
GSM	Global System for Mobile Communications (Mobilfunkstandard für leitungs- und paketvermittelnde Datenübertragung)
MEO	Medium Earth Orbit (Satellitenorbit in einer Höhe zwischen 1.000 km und 30.000 km)
MSAS	Multi-functional Satellite Augmentation System (satellitengestützter Korrekturdienst der japanischen Regierung)
N	Stickstoff
NAVSTAR-GPS	Navigational Satellite Timing and Ranging Global Positioning System (offizieller Name des amerikanischen GPS)
NMEA-Datenformat	Einheitlicher Übertragungsstandard; eingeführt durch die US-amerikanische National Marine Electronics Association
PRN-Code	Pseudo Random Noise (Pseudozufälliges Rauschen)
RMS	Wahrscheinlichkeit von 63-67 %
RTK	Real-Time-Kinematik
SA	Selective Availability (selektive Verfügbarkeit)
SBAS	Satellite Based Augmentation System (satellitenbasierte Ergänzungssysteme; z.B. EGNOS)
WAAS	Wide Area Augmentation System (satellitengestützter Korrekturdienst Amerikas)