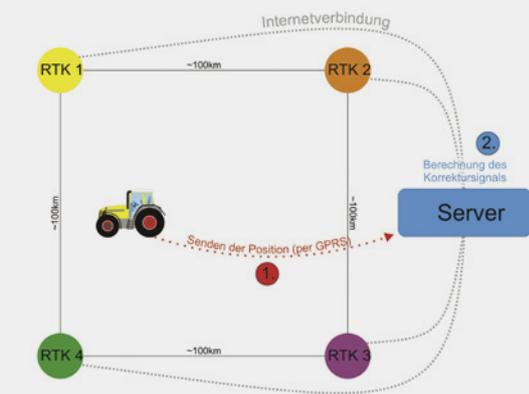
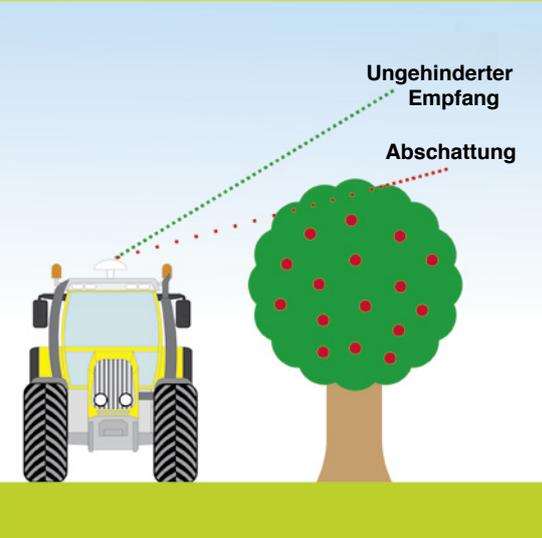


Satellitenortungssysteme (GNSS) in der Landwirtschaft



DLG-Mitgliedschaft. Wir geben Wissen eine Stimme.



Jetzt Mitglied werden!

Die DLG ist seit mehr als 130 Jahren offenes Netzwerk, Wissensquelle und Impulsgeber für den Fortschritt.

Mit dem Ziel, gemeinsam mit Ihnen die Zukunft der Land-, Agrar- und Lebensmittelwirtschaft zu gestalten.

www.DLG.org/Mitgliedschaft



DLG-Merkblatt 388

Satellitenortungssysteme (GNSS) in der Landwirtschaft

Autoren

- DLG-Ausschuss Arbeitswirtschaft und Prozesstechnik
- Professor Dr. agr. Patrick Ole Noack, Hochschule Weihenstephan-Triesdorf

Alle Informationen und Hinweise ohne jede Gewähr und Haftung

Herausgeber:

DLG e.V.
Fachzentrum Landwirtschaft
Eschborner Landstraße 122, 60489 Frankfurt am Main

3. Auflage, Stand: 5/2016

© 2018

Vervielfältigung und Übertragung einzelner Textabschnitte, Zeichnungen oder Bilder – auch für den Zweck der Unterrichtsgestaltung – nur nach vorheriger Genehmigung durch DLG e.V., Servicebereich Marketing, Eschborner Landstraße 122, 60489 Frankfurt am Main, Tel. +49 69 24788-209, M.Biallowons@DLG.org

Inhalt

1. Einleitung	5
2. Aufbau und Funktion von Satellitenortungssystemen (GNSS)	6
2.1 Raumkomponente	6
2.2 Bodenkomponente	6
2.3 Prinzip der Laufzeitmessung	6
3. Aufbau und Funktionsweise von GNSS-Sensoren	7
3.1 Aufbau und Bauformen von GNSS-Sensoren	7
3.2 Merkmale von GNSS-Sensoren	9
3.2.1 Messwerte eines GNSS-Sensors	9
3.2.2 Genauigkeit	10
3.2.3 Schnittstellen (NMEA 0183, NMEA 2000)	12
4. Genauigkeit von GNSS-Sensoren	12
4.1 Fehlerquellen bei der Positionsbestimmung	12
4.2 Genauigkeitsmaße	13
4.2.1 Absolute Genauigkeit	14
4.2.2 Relative Genauigkeit	15
4.2.3 Spur-zu-Spur-Genauigkeit	15
4.2.4 Statische und dynamische Genauigkeit	16
5. Korrekturdatensysteme für GNSS-Sensoren	16
5.1 Übertragung von Korrekturdaten	16
5.2 Korrekturdatenformate	17
5.3 WAAS/EGNOS	18
5.4 StarFire I	19
5.5 Trimble Range Point RTX	19
5.6 StarFire II	19
5.7 OmniSTAR XP/HP/G2	20
5.8 Trimble Center Point RTX	20
5.9 RTK-Referenzstationen (mobil und fest)	20
5.10 RTK-Netzwerke	22
6. Einsatzgebiete von GNSS-Sensoren in der Landwirtschaft	23
6.1 Vermessung und Kartierung	23
6.2 Parallelführung, Lenk- und Lenkassistenzsystem	24
6.3 Steuerung von Anbaugeräten	24
6.4 Dokumentation und Messwerterfassung	24
7. Literatur	25

1. Einleitung

Die Landwirtschaft hat in der Vergangenheit von vielen militärischen Errungenschaften profitiert. Der großflächige Einsatz von mineralischem Stickstoffdünger wurde erst durch die industrielle Synthese von Ammoniak für die Munitionsherstellung im ersten Weltkrieg möglich. Nach dem zweiten Weltkrieg wurden auf Basis von militärischen Nervengasen neue Pestizide entwickelt [1].

Auch die Entwicklung von Satellitenortungssystemen wurde vom Militär angestoßen. Genaue Informationen über den eigenen Standort sind die Grundlage der Kriegsführung. Neben und nach dem Militär hatte auch die Schifffahrt starkes Interesse an Satellitenortungssystemen. Hier stand die Vereinfachung der Navigation auf offenen Gewässern und Meeren im Vordergrund. Die National Marine Electronics Association (NMEA) hat sich bereits Anfang der 80er Jahre mit der Erarbeitung von Standards (NMEA 0183) eingebracht, die bis heute gültig sind (siehe 3.2.3).

Die Landwirtschaft hat nach der Schifffahrt als erster Industriezweig versucht, Satellitenortung für die Optimierung der Produktion einzusetzen. Bereits in den frühen 1990er Jahren wurden die ersten Versuche zur lokalen Ertragsermittlung mit GPS unternommen – lange bevor die ersten Navigationssysteme für Kraftfahrzeuge eingeführt wurden. Die Ergebnisse damals waren wenig ermutigend: das amerikanische Militär hatte sein GPS-System für den Einsatz im ersten Irakkrieg optimiert, sodass die Positionsgenauigkeit für die zivile Nutzung im Bereich von 100 m lag. In den Folgejahren konnte die Positionsgenauigkeit mit Hilfe differenzieller Korrekturen (DGPS) auf 5 m verbessert werden.

Die ersten Ertragskarten zeigten, dass Erträge auf Teilflächen erheblich vom mittleren Ertrag eines Schlages abweichen können. Aus dieser Erkenntnis erwuchs die Idee, die Teilflächen mit Hilfe von GPS standortangepasst zu bewirtschaften. Für dieses Verfahren hat sich die Bezeichnung *Precision Farming* oder *Precision Agriculture* durchgesetzt.

Die praktische Umsetzung der standortangepassten Bewirtschaftung war (und ist) mit vielen Schwierigkeiten behaftet. Die Frage, ob Niedrigertragszonen bei der Düngung mit Auf- oder Abschlägen versehen werden sollen, lässt sich nicht pauschal beantworten. Die Erstellung von Sollwertkarten erfordert daher bis heute Zusatzinformationen oder Expertenwissen. Aufgrund der schleppenden Standardisierung ist die Erstellung von Sollwertkarten für Terminals unterschiedlicher Hersteller und die positionsabhängige Steuerung von Anbaugeräten nicht nahtlos in den normalen Betriebsablauf zu integrieren. Die Umsetzung der standortangepassten Bewirtschaftung ist deshalb stark von der Motivation und Qualifikation der Betriebsleiter abhängig.

In den späten 1990er Jahren wurden die ersten GPS-gestützten Parallelführungssysteme vorgestellt. Die Systeme zeigten mit einer Genauigkeit von 30 bis 50 cm auf einem Lichtbalken die Abweichung von der Sollfahrspur an. Die Akzeptanz für die GPS-gestützte Parallelführung war wegen des hohen Preises und der schlechten Erfahrungen mit GPS (s. o.) zunächst gering.

Seit 2003 sind automatische Lenksysteme für Traktoren verfügbar. Diese Technologie hat sich ständig weiter entwickelt und stellt heute sicherlich die wichtigste Anwendung von Satellitenortungssystemen in der Landwirtschaft dar. Gründe für die starke Akzeptanz von Lenksystemen sind die im Gegensatz zur standortangepassten Bewirtschaftung einfache Bedienung und der unmittelbare Nutzen.

Die GPS-gestützte Teilbreiten- und Einzelreihenabschaltung von Pflanzenschutzspritzen, Düngerstreuern und Sämaschinen gewinnt zurzeit stark an Bedeutung. Dabei werden in der Regel die in Form von Parallelführungs- oder Lenksystemen vorhandenen GNSS-Sensoren genutzt. Ebenso wie bei

Lenksystemen sind Nachfrage und Akzeptanz wegen der einfachen Bedienung und dem zeitnahen Nutzen hoch.

Die Bedeutung von Satellitenortungssystemen für die Landwirtschaft hat in den letzten 20 Jahren stark zugenommen. Die Möglichkeit, Fahrzeuge zu orten und zu navigieren, Ausbringmengen zu regeln und Prozessdaten (Ertrag, Verbrauch, Mengen) zu dokumentieren, bietet einen großen Spielraum dafür, die landwirtschaftliche Produktion betriebswirtschaftlich und pflanzenbaulich zu optimieren. Es ist davon auszugehen, dass hierbei noch nicht alle Möglichkeiten ausgeschöpft sind.

2. Aufbau und Funktion von Satellitenortungssystemen (GNSS)

Satellitenortungssysteme werden allgemein als GNSS bezeichnet. Die Abkürzung steht für Global Navigation Satellite System und bezeichnet einen Komplex aus Satelliten und Bodenstationen, mit dem auf Basis von Signallaufzeitmessungen Positionen und Bewegungsrichtungen von stationären oder mobilen Empfangseinheiten („GPS-Empfänger“, „GNSS-Sensoren“) bestimmt werden können.

Das bekannteste GNSS ist das amerikanische GPS (Global Positioning System). Neben GPS werden verschiedene andere GNSS wie GLONASS, GALILEO und COMPASS betrieben oder aufgebaut.

2.1 Raumkomponente

Satelliten spielen bei GNSS eine zentrale Rolle. Sie bestehen im Wesentlichen aus einer Stromversorgung, einer Atomuhr sowie Sende- und Empfangseinheiten für die Kommunikation mit dem Bodensegment und die Aussendung von Ortungssignalen. GNSS-Satelliten übertragen regelmäßig im Frequenzbereich 1,2 bis 1,6 GHz Signale, die einen Zeitstempel (PRN-Code) sowie eine eindeutige Kennung des Satelliten enthalten (SVN – space vehicle number). In größeren zeitlichen Abständen werden sogenannte Ephemeriden ausgesendet. Diese enthalten Informationen über die Bahndaten der Satelliten und ermöglichen einem GNSS-Sensor die aktuelle Position des Satelliten im Weltraum zu ermitteln.

2.2 Bodenkomponente

Die Bodenkomponente eines GNSS besteht aus verschiedenen Kontrollstationen, die die Flugbahn der Satelliten überwachen und gegebenenfalls korrigieren. Die Bodenkontrollstationen überwachen außerdem die korrekte Funktion (Integrität) aller zum GNSS gehörigen Satelliten und des Gesamtsystems. Im Fehlerfall werden einzelne Satelliten als nicht funktionsfähig (*unhealthy*) gekennzeichnet und dann von GNSS-Sensoren nicht bei der Berechnung der Position berücksichtigt.

Die Kontrollstationen ermitteln Abweichungen der erwarteten Flugbahn von Satelliten und ihrer Atomuhren und fassen die aktuellen Bahndaten und Uhrenfehler regelmäßig in Form sogenannter Ephemeriden (oder Almanachs) zusammen. Die Kontrollstationen stellen den Empfangsgeräten die Ephemeriden über die Satelliten zur Verfügung.

2.3 Prinzip der Laufzeitmessung

Die Positionsbestimmung mit GNSS ist der Positionsbestimmung mit Sextanten ähnlich. Mit Hilfe von Sextanten werden die Winkel zwischen Sternen bestimmt. Aus drei Winkelmessungen kann die Position berechnet werden (Triangulation).

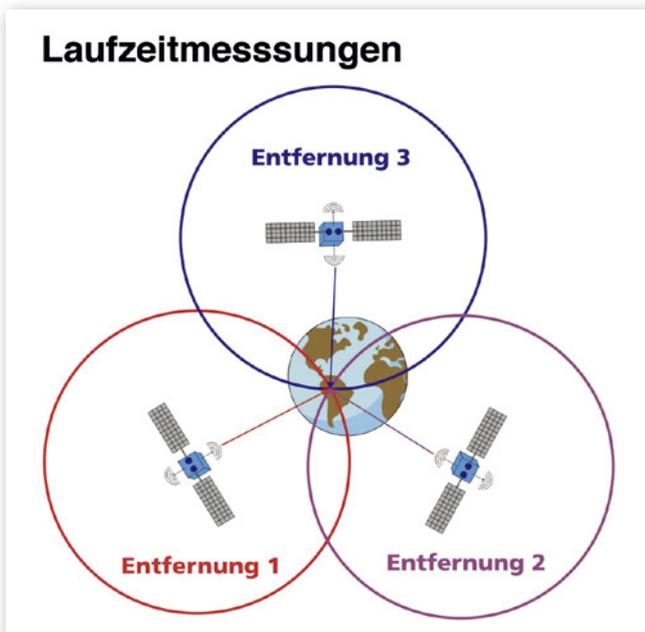


Abbildung 1: Laufzeitmessung von Satellitensignalen als Grundlage der Positionsbestimmung

werden – vergleichbar einer Kugel, die an drei straffen Fäden von der Decke hängend in einer Position verharrt (vergleiche Abbildung 1).

3. Aufbau und Funktionsweise von GNSS-Sensoren

3.1 Aufbau und Bauformen von GNSS-Sensoren

GNSS-Sensoren („GPS-Empfänger“) bestehen aus einer Antenne und einem Empfänger – einer Recheneinheit zur Verarbeitung der Signale und Ausgabe der Positionsdaten.



Abbildung 2: Integrierte GNSS-Antennen-/Empfängerkombination

Bei der Positionsmessung mit GNSS werden die Positionen aus drei Entfernungsmessungen abgeleitet (Trilateration). Die Satelliten übertragen neben ihrer eindeutigen Kennung einen Zeitstempel der integrierten Atomuhr. Nachdem das Signal am Empfänger eingetroffen ist, bestimmt dieser wie lange das Signal für seine Reise vom Satelliten zur Antenne benötigt hat (Laufzeit). Ausgehend von der Annahme, dass sich das Signal mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitet, kann aus der Laufzeit und der Lichtgeschwindigkeit die Entfernung zwischen dem Satelliten und der Antenne berechnet werden (*pseudo range*).

Die Position der Satelliten im Weltall ist dem GNSS-Empfänger aus den Ephemeriden bekannt und aus drei Positionen und drei Entfernungen kann die Position der Antenne eindeutig bestimmt

Antenne und Empfangseinheit können in einem Gehäuse integriert sein. Man spricht dann von einer Smartantenne. Diese integrierte Bauform findet sich vor allem dann, wenn GNSS-Sensoren als Teil eines Lenksystems auf Fahrzeugen oder Anbaugeräten eingesetzt werden.

Die Güte von GNSS-Antennen unterscheiden sich aufgrund ihrer Bauform und Qualität zum Teil erheblich. Die Antennen unterscheiden sich ebenfalls in ihrer Fähigkeit, Signale unterschiedlicher Frequenzbänder zu empfangen (L1 und L2 GPS-Frequenz, GLONASS, GALILEO, EGNOS). Daraus ergibt sich, dass nicht jede Antenne für jeden Empfänger geeignet ist. Die Genauigkeit eines GNSS-Sensors wird also nicht nur vom Empfänger, sondern auch maßgeblich durch die Antenne beeinflusst.



Abbildung 3: GNSS-Empfangsantenne
(Quelle: www.gpssource.com)



Abbildung 4: Display mit integriertem GNSS-Empfänger
(© Trimble Navigation Limited)

Vereinzelt werden die Empfangseinheiten in die Bedienterminals von Lenksystemen integriert. Die Antenne wird dann abgesetzt auf dem Dach montiert. Diese Bauform bietet den Vorteil, dass Lenksysteme schneller von einem Fahrzeug auf ein anderes umgesetzt werden können.

In Fahrzeugen eingesetzte GNSS-Empfänger werden in der Regel über das 12 V Bordnetz mit Strom versorgt. Beim Einsatz als getragenes Kartierungssystem erfolgt die Versorgung über eine externe 12 V Batterie.

Empfänger mit abgesetzter Antenne werden mittels eines Koaxialkabels mit der Antenne verbunden. Da die Kabel empfindlich auf Biegungen, Wicklungen und Quetschung reagieren, sollten sie in Fahrzeugen fachgerecht unter der Verkleidung montiert werden.

Alle GNSS-Empfänger verfügen über Schnittstellen zur Datenausgabe. Die Übertragung der Daten an einen PC oder ein Lenksystem erfolgt in der Regel als serielle Kommunikation (RS 232) auf Basis



Abbildung 5: GNSS-Empfänger mit abgesetzter Empfangsantenne (© Trimble Navigation Limited)



Abbildung 6: Handheldrechner mit integriertem GNSS-Empfänger (Quelle: www.leica-geosystems.com)

des NMEA 0183 Protokolls. Ausgewählte GNSS-Sensoren können Positionsdaten auch im ISO 11783/ NMEA2000/J1939 Format auf einen CAN Bus übertragen.

Als spezielle, für den getragenen Einsatz optimierte Variante, werden Handheldrechner mit integrierten GNSS-Sensoren angeboten. Sie werden hauptsächlich für die (Flächen-)vermessung und Kartierung eingesetzt. Die Rechner verfügen über interne Batterien, die auch den GNSS-Sensor mit Strom versorgen. Die Antenne ist bei diesen Geräten in der Regel ebenfalls integriert. Die Genauigkeit von in Handheldrechnern integrierten GNSS-Sensoren ist durch die Qualität der Antennen meist eingeschränkt.

3.2 Merkmale von GNSS-Sensoren

3.2.1 Messwerte eines GNSS-Sensors

GNSS-Sensoren bestimmen mittels Laufzeitmessung von Satellitensignalen die dreidimensionale Position ihrer Antenne. Neben der Position, die in der Regel als geografische Länge und geografische Breite ausgegeben wird (Koordinatensystem WGS 84, Länge/Breite, EPSG 4326), ermitteln GNSS-Sensoren auch die Höhe.

Die Höhenmessungen beziehen sich dabei auf das WGS 84 Ellipsoid, einem mathematischen Modell, das effizient, aber nicht exakt, die Form der Erde beschreibt. Überzeichnet gesehen sieht die Erde aufgrund des wechselnden Aufbaus der Erdkruste aus wie eine Kartoffel.

Die tatsächliche Form der Erde wird als Geoid bezeichnet. Die meisten GNSS-Sensoren geben zusätzlich zur ellipsoidischen Höhe die lokale Abweichung zwischen Ellipsoid und Geoid aus. Dieser Wert wird als Geoidseparation bezeichnet und erlaubt die Berechnung der Höhe über Normalnull (NN) oder Mean Sea Level (MSL). Da die Geoidmodelle meist eine geringe Auflösung haben, ist es schwierig die absolute Höhe über MSL mit GNSS genau zu bestimmen. Die relative Genauigkeit der Höhenmessungen ist etwa um den Faktor Drei schlechter als die Genauigkeit der Positionsbestimmung.

Das Potenzial der Höhenmessung mit GNSS-Sensoren ist in der Landwirtschaft bisher weitgehend ungenutzt. Bei der Ertragskartierung und der Nutzung von Parallelführungs- und Lenksystemen können die Höhenmessungen ohne zusätzli-

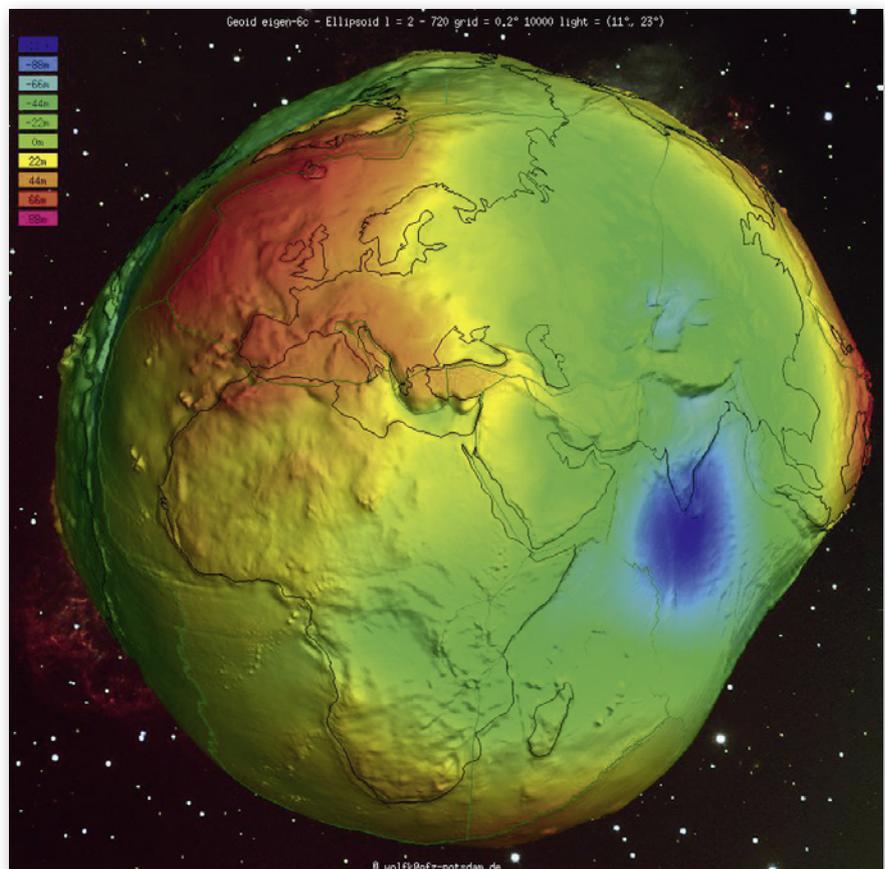


Abbildung 7: Geoid, Modell der Erdoberfläche
(Quelle: <http://icgem.gfz-potsdam.de>)

chen Aufwand aufgezeichnet werden. Aus den Höhenmessungen lassen sich mit geeigneter Software, wie zum Beispiel den meisten Ertragskartierungsprogrammen, digitale Geländemodelle (DGM, DTM) erstellen. Diese Geländemodelle können wiederum als Grundlage für die Bewertung von Teilflächen dienen (Wasserhaushalt, Nährstoffeintrag, Strahlungsgenuss).

Neben Position und Höhe bestimmen GNSS-Sensoren auch die Geschwindigkeit sehr genau. Die Geschwindigkeit wird dabei nicht aus den Laufzeiten der Signale, sondern aus der Frequenzverschiebung berechnet (Doppler-Effekt). Die Geschwindigkeitsmessung mit GNSS ist vor allem bei geringen Geschwindigkeiten wesentlich genauer als die Messungen von Radar- und Radsensoren. Somit sind die Messwerte sehr gut für die Regelung geschwindigkeitsabhängiger Prozesse (Mengenregelung von Düngerstreuern, Pflanzenschutzspritzen, Sä- und Pflanzmaschinen) geeignet.

Schlussendlich liefert ein GNSS-Sensor die genaue Uhrzeit: die Laufzeitmessungen basieren auf extrem genauen Atomuhren in den Satelliten. Somit können mit GNSS-Sensoren alle im Feld erfassten Werte (z. B. Position, Ertrag, Spektralwerte aus Sensoren, Dieserverbrauch) mit einem Zeitstempel versehen werden. Dies ermöglicht eine unbestechliche Dokumentation und erleichtert die spätere Auswertung der Daten nach betriebswirtschaftlichen und logistischen Gesichtspunkten erheblich.

3.2.2 Genauigkeit

Die Genauigkeit von GNSS-Sensoren hängt von verschiedenen Faktoren ab. Entscheidend sind neben der Qualität der Antenne, der Signalfilterung und den Algorithmen für die Signalverarbeitung die Anzahl der verfügbaren Satelliten, die Konstellation der Satelliten und das Ausmaß der atmosphärischen Störungen in der Ionosphäre. Zusätzlich wirken sich Fehler bei der Bestimmung der Satellitenumlaufbahnen und Uhrenfehler auf die Genauigkeit von GNSS aus.

Da der Einfluss der Atmosphäre und die Satellitenkonstellation sich ständig ändern, lassen sich aus einer über einen kurzen Zeitraum durchgeführten Messung keine zuverlässigen Aussagen zur Genauigkeit eines GNSS-Sensors ableiten.

Aus langfristigen und wiederholten Testmessungen ergeben sich statistische Kennzahlen, die die Genauigkeit eines GNSS-Sensors beschreiben. Die Genauigkeit wird meist als RMS (65–68%) oder 2 RMS (95%) angegeben. Diese Genauigkeitsmaße besagen, dass die Sensoren 68% bzw. 95% der Zeit eine geringere Abweichung zur Referenz aufweisen als der angegebene Wert.

Die Genauigkeit von GNSS-Sensoren ist unter dynamischen Bedingungen (in der Bewegung) in der Regel genauer als unter statischen Bedingungen (Stillstand). Die Sensoren nutzen in der Bewegung die aus der Doppler-Verschiebung der Satellitenfrequenzen abgeleitete Geschwindigkeit und Bewegungsrichtung, um die Laufzeitmessungen zu bewerten und gegebenenfalls zu korrigieren. Durch Nutzung zweier unabhängiger Messverfahren (Laufzeit und Frequenzverschiebung) kann die Qualität der Positionsbestimmung in der Bewegung verbessert werden. Um den Unterschieden bei der Positionsbestimmung Rechnung

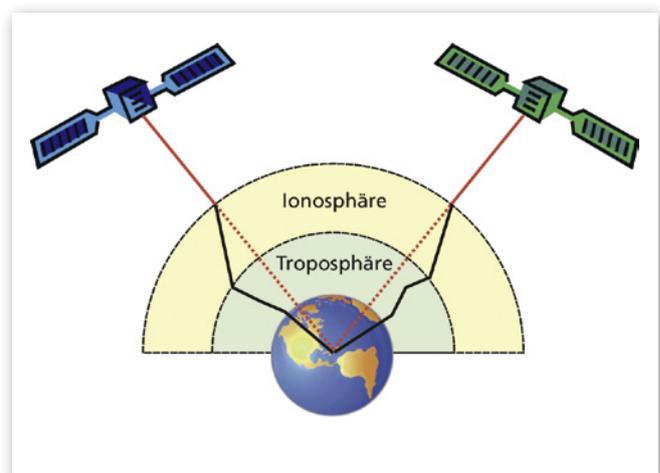


Abbildung 8: Einfluss der Ionosphäre auf Satellitensignale

zu tragen, wird bei den Genauigkeitsmaßen zwischen statischer und dynamischer Genauigkeit unterschieden.

Nicht bei allen Anwendungen ist die absolute Genauigkeit (Abweichung von der wahren Position) relevant. Für viele landwirtschaftliche Anwendungen ist die relative Genauigkeit, bezogen auf die letzte oder die letzten Positionen, das entscheidende Maß. Wenn Flächen alleine mit dem Ziel vermessen werden, ihre Größe zu bestimmen, ist die absolute Positionsgenauigkeit des eingesetzten GNSS-Sensors irrelevant. Wenn alle während der Umfahrung der Fläche aufgezeichneten Positionen einen gleichbleibenden Versatz in dieselbe Richtung haben, ist die Größe der Fläche genau, obwohl die Position des Umrisses gegen die reale Lage der Feldgrenze verschoben ist. Für die klassische Parallelführung (z. B. Herbizidanwendung im Voraufbau) ist nicht die absolute Lage der Fahrspuren, sondern deren Abstand zueinander entscheidend. Solange dieser Abstand der Arbeitsbreite der Feldspritze entspricht, werden Überlappungen und Fehlstellen unabhängig von der absoluten Genauigkeit der Positionsmessung vermieden. Deshalb wird bei der Angabe der Genauigkeit zwischen absoluter Genauigkeit (Abweichung der wahren Position) und der relativen Genauigkeit (Abweichung von den zuletzt gemessenen Positionen) unterschieden.

Die Spur-zu-Spur-Genauigkeit oder der Spurfehler ist eine Sonderform der relativen Genauigkeit. Bei der Berechnung des Spurfehlers wird lediglich der Abstand von der Soll- oder Referenzlinie eines Parallelführungs- oder Lenksystems betrachtet. Es wird also nur der Fehler quer zur Fahrtrichtung und nicht der Positionsfehler in Fahrtrichtung berücksichtigt. Insofern ist die Spur-zu-Spur-Genauigkeit immer höher oder maximal genauso gering wie die relative Positionsgenauigkeit des GNSS-Sensors.

Welches Genauigkeitsmaß eines GNSS-Sensors relevant ist, hängt von der Anwendung ab. Bei der Erfassung von Messwerten wie Ertragsdaten, der tatsächlichen Ausbringungsmengen oder der Erfassung von Prozessdaten (z. B. Dieserverbrauch) ist die absolute Positionsgenauigkeit von Interesse. Bei der Erfassung von Messwerten werden jedoch in der Regel geringe Ansprüche an die absolute Genauigkeit gestellt (1 m RMS).

Beim Vermessen von Schlaggrößen und beim Parallelfahren mit großen Arbeitsbreiten wird meist die relative, dynamische Genauigkeit als Maßstab für die Genauigkeit der Positionsbestimmung eingesetzt.

Bei komplexen produktionstechnischen Verfahren wie *Strip Tillage* oder *Controlled Traffic Farming*, sowie bei der Anlage und Pflege von Reihen- und Sonderkulturen und beim Einsatz von Lenksystemen im landwirtschaftlichen Versuchswesen werden hingegen höchste Ansprüche an die absolute Genauigkeit gestellt.

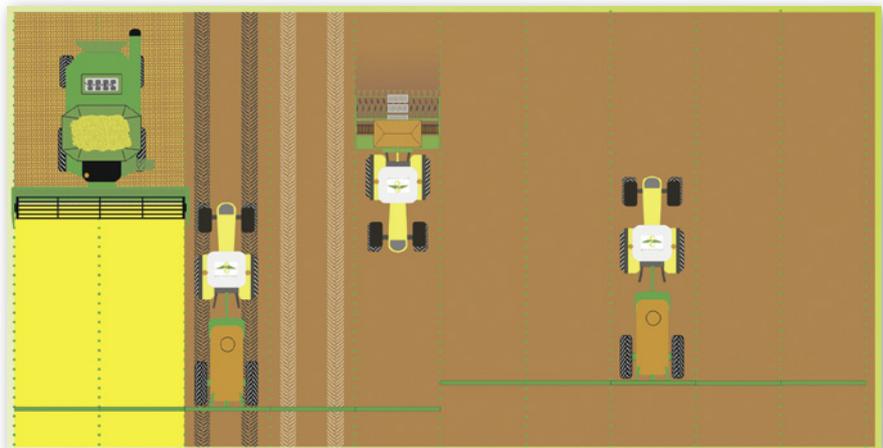


Abbildung 9: Controlled Traffic Farming (Regelfahrspurverfahren)

3.2.3 Schnittstellen (NMEA 0183, NMEA 2000)

GNSS-Sensoren geben die Positionsdaten und andere von den Sensoren ermittelte Messwerte wie Zeit, Datum, Geschwindigkeit und Fahrtrichtung in der Regel über eine serielle Schnittstelle (RS 232) aus. Die Übertragung der Daten erfolgt als ASCII Klartext im NMEA 0183 Format. Die NMEA-Nachrichten werden von Recheneinheiten gelesen und für Vermessung von Punkten, das räumliche Erfassen von Sensormesswerten oder das Steuern und Regeln (z. B. Lenken, teilflächenspezifische Applikation) genutzt.

Die Übertragungsrates von NMEA Daten ist bei den meisten Sensoren in einem Bereich zwischen 2.400 und 115.200 Baud einstellbar. Die Baudrate sollte sich an der Anzahl der Nachrichten und der Häufigkeit der Datenübertragung (Updaterate) orientieren. Bei zu geringer Baudrate können Daten bei der Übertragung verloren gehen, wenn viele Datensätze mit einer hohen Frequenz übertragen werden. Die Updaterate sollte der Anwendung angepasst sein: bei Teilbreitenschaltungs- und Lenksystemen sind Updateraten von mindestens 5 Hz (5 Messwerte pro Sekunde) erforderlich, bei der Prozessdatenerfassung oder Ertragskartierung sind Updateraten von 1 Hz in der Regel ausreichend.

```
$GPVTG,354.68,T,,M,0.04,N,0.08,K,D*38
$GPGGA,073149.00,4850.29876,N,01112.23416,E,2,07,1.3,452.8,M,4
7.2,M,5.0,0124*4E
$GPZDA,073149.00,13,04,2011,00,00*6A
```

Abbildung 10: NMEA 0183 Nachrichten

Ausgewählte GNSS-Sensoren sind in der Lage, ihre Messwerte auf einem CAN Bus auszugeben. Die Datenausgabe folgt dann in der Regel dem NMEA 2000 Standard beziehungsweise dem angelehnten ISO 11783 Standard (Teil 3 und 5). Für die Übertragung im Nutzfahrzeugbau sind vereinzelte Messwerte im J1939 Standard definiert. Der Vorteil der Übertragung von GNSS-Messwerten über den CAN Bus liegt in der Möglichkeit, mit Hilfe einer einzigen physischen Schnittstelle unterschiedliche Subsysteme (Lenkung, Teilbreitenschaltung, Mengenregelung) mit Daten zu versorgen.

4. Genauigkeit von GNSS-Sensoren

4.1 Fehlerquellen bei der Positionsbestimmung

Die Positionsbestimmung mit GNSS beruht auf der Messung von Signallaufzeiten vom Satellit zur Empfangsantenne. Es wird dabei davon ausgegangen, dass sich das Satellitensignal geradlinig und mit gleich bleibender Geschwindigkeit bewegt.

Tatsächlich werden die Signale beim Eintritt in die Atmosphäre, vor allem in der Ionosphäre, abgelenkt. Das Ausmaß der Ablenkung ist vom Zustand der Ionosphäre abhängig. Dieser wird vor allem durch Sonnenwinde beeinflusst. Die Sonnenwinde unterliegen erheblichen Schwankungen. Der durch den Elektronengehalt der Ionosphäre bedingten Fehler hat insgesamt den größten Einfluss auf die Positionsgenauigkeit von GNSS-Sensoren (Abbildung 11).

Auch die Verhältnisse in der tiefer gelegenen Troposphäre (Druck, Luftfeuchte, Temperatur) beeinflussen die Laufzeit von Satellitensignalen.

Neben den durch die Atmosphäre bedingten Laufzeitfehlern beeinflussen Fehler in den Atomuhren der Satelliten und fehlerhafte Bahndaten der Satelliten die Positionsgenauigkeit von GNSS-Sensoren.

GNSS-Satelliten sind mit hochgenauen Atomuhren ausgestattet. Aufgrund der geringen Signallaufzeiten (weniger als 100 ns), wirken sich jedoch auch geringe Fehler bei der Zeitbestimmung auf die Laufzeitmessung und damit auf die Positionsgenauigkeit aus. Die Uhrenfehler werden laufend von Bodenkontrollstationen überwacht und korrigiert. Trotzdem können Fehler im Bereich von

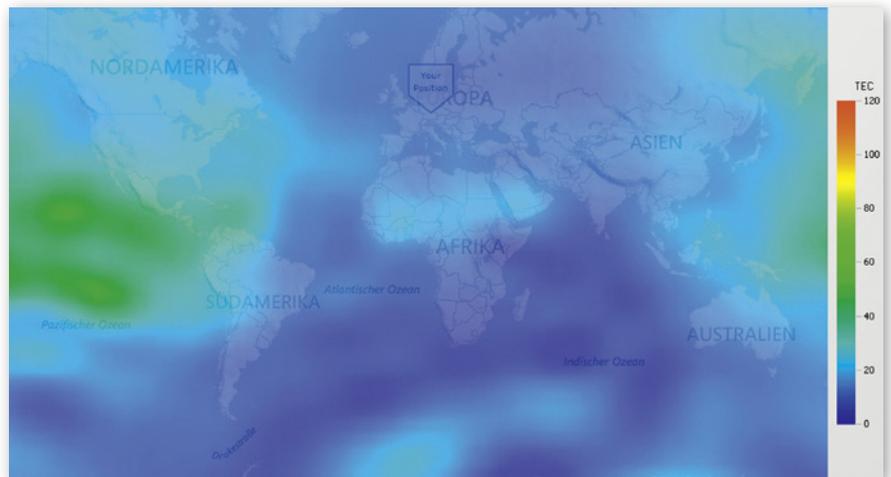


Abbildung 11: Aktivität in der Ionosphäre
(Quelle: <http://icgem.gfz-potsdam.de>)

bis zu 10 ns zu einem Positionsfehler von mehr als 1 m führen.

Die Berechnung der Antennenposition unter Berücksichtigung der Signallaufzeit geht davon aus, dass die Position der Satelliten genau bekannt ist. Die Umlaufbahn der Satelliten wird jedoch durch unterschiedliche Faktoren beeinflusst und weicht deshalb von der theoretisch berechneten Laufbahn ab. Die Bahnfehler oder Fehler in der Satellitenposition können Fehler in der Größenordnung von bis zu 10 m verursachen.

Die Fehlerquellen bei der Laufzeitmessung und deren Ausmaß sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Tabelle 1: Fehlerquellen bei der Laufzeitmessung

(Quelle: nach https://de.wikipedia.org/wiki/Globales_Navigationssatellitensystem; verändert)

Fehlerquelle	Zeitfehler	Positionsfehler
Satellitenposition	6 – 60 ns	1 – 10 m
Zeitdrift	0 – 9 ns	0 – 1,5 m
Ionosphäre	0 – 180 ns	0 – 90 m
Troposphäre	0 – 60 ns	0 – 10 m

Die Fehler, die bei der Laufzeitmessung entstehen, werden durch die Verarbeitung sogenannter DGPS-Korrekturdaten deutlich reduziert (siehe Kapitel 5).

Alle oben genannten Fehlerquellen unterliegen einer zeitlich Dynamik, sind also nicht konstant. Dies erschwert die Beurteilung der Genauigkeit eines GNSS-Sensors erheblich.

4.2 Genauigkeitsmaße

Neben Hardware und Software wirken sich vor allem die Aktivität der Ionosphäre sowie Abweichungen der Satelliten von ihrer Bahn und Uhrenfehler auf die Positionsgenauigkeit von GNSS-Sensoren aus.

Neben den sich ändernden Einflüssen auf den Laufzeitfehler wirkt sich auch die Satellitenkonstellation auf die Positionsgenauigkeit von GNSS-Sensoren aus. Die Satelliten befinden sich auf einer Umlaufbahn und sind nicht geostationär. Somit ändern sich der Winkel und die Entfernung zwischen Satelliten und Empfangsantenne ständig. Bei Unterschreitung eines – oft einstellbaren – Winkels über dem

Horizont (Elevationsmaske), werden die Signale von Satelliten nicht mehr für die Positionsbestimmung herangezogen.

Entscheidend für die Positionsgenauigkeit sind die Anzahl der verfügbaren Satelliten und ihre Stellung zueinander. Als Qualitätsmaß für die Stellung wird die sogenannte *dilution of precision* (DOP) herangezogen. Je größer der Raum zwischen den Satelliten und der Empfangsantenne ist, desto kleiner der DOP Wert und desto besser die Positionsgenauigkeit. Dieser Qualitätsindikator wird von Empfängern in der NMEA GGA Nachricht ausgegeben.

Aufgrund der dynamischen Verhältnisse in der Atmosphäre und der sich beständig ändernden Satellitenkonstellation ist ein einzelner Positionsmesswert nicht für die Beurteilung der Positionsgenauigkeit geeignet. Erst die statistische Auswertung mehrerer Messungen kann für die Beurteilung der Qualität von GNSS-Sensoren herangezogen werden.

Aus diesem Grund wird die Genauigkeit von GNSS-Sensoren in statistischen Maßzahlen angegeben. In der Regel erfolgt die Angabe als RMS (*root mean square error* = mittlere Wurzel der quadratischen Abweichungen) oder 2 RMS. Die Werte geben Auskunft darüber, wie oft der Positionsfehler einen Grenzwert unterschreitet. Beim RMS Fehler liegt die Grenze zwischen 63% und 68%. Der 2 RMS Fehler liegt zwischen 95% und 98%. Selten wird auch der CEP angegeben (50%).

Beispiel: der Wert 15 cm (RMS) bedeutet, dass die Positionen eines Empfängers 63%/68% der Zeit weniger als 15 cm von einer Referenzposition abweichen.

4.2.1 Absolute Genauigkeit

Bei der absoluten Genauigkeit wird die wahre Position der Antenne eines GNSS-Sensors als Referenzposition mit den Messwerten abgeglichen. Die entsprechenden Qualitätsmaße sagen dann aus, wie stark die gemessene Position von der wahren Position abweicht.

Die absolute Positionsgenauigkeit ist nicht für alle landwirtschaftlichen Anwendungen relevant. Vor allem beim Parallelfahren und für das Schalten von Teilbreiten ist die absolute Positionsgenauigkeit oft von untergeordneter Bedeutung. Wichtig wird sie dann, wenn Maßnahmen basierend auf Offizialdaten (z. B. Flur- und Katastergrenzen) durchgeführt werden. Auch bei langfristiger

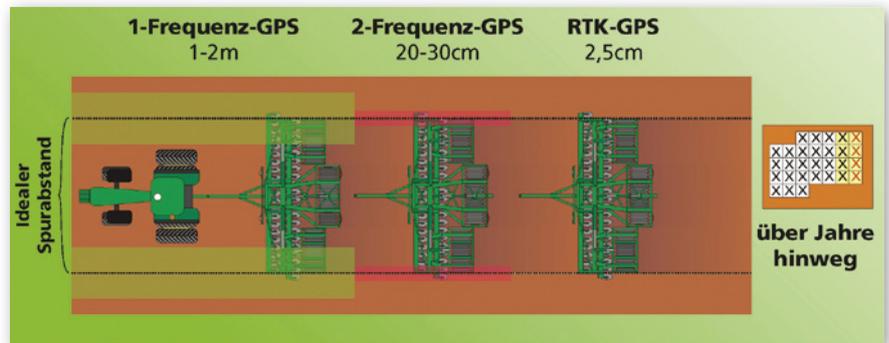


Abbildung 12: Wiederholbare Genauigkeit von Lenksystemen

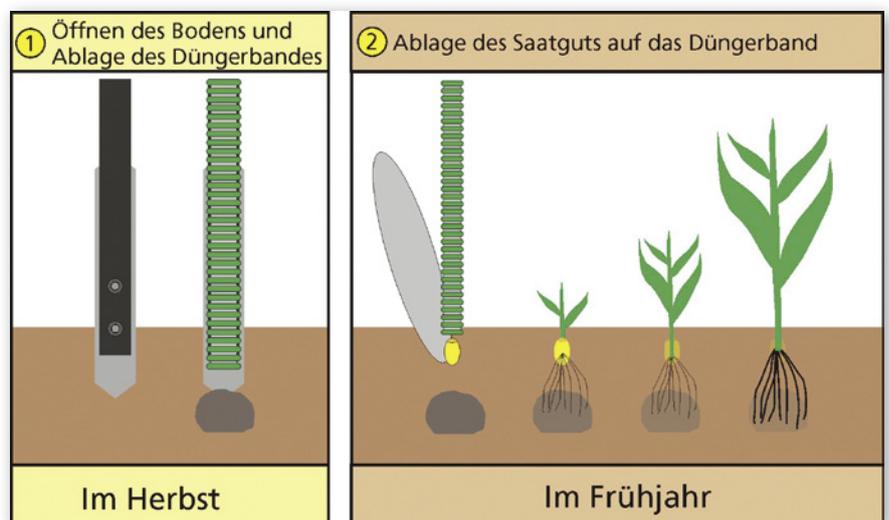


Abbildung 13: Strip Tillage oder streifenweise Bearbeitung

Nutzung von einmal aufgezeichneten Fahrspuren (Controlled Traffic, Strip Till, Dauerkulturen) spielt die Fähigkeit, Positionen absolut genau zu bestimmen, eine wichtige Rolle.

4.2.2 Relative Genauigkeit

Bei der relativen Genauigkeit werden mehrere Positionsmessungen innerhalb eines relativen kurzen Zeitraums (< 1 h) mit ihrem Mittelwert als Referenzposition verglichen. Sie erlaubt somit eine Aussage darüber, wie gut ein GNSS-Sensor kurzfristig die Veränderungen der Ionosphäre und der Satellitenkonstellation ausgleichen kann.

Wenn bei der Vermessung von Nutzflächen die Lage nicht entscheidend ist, sondern nur die Größe der Fläche ermittelt werden soll, ist hierfür allein die relative Genauigkeit der Positionsmessungen ausschlaggebend. Wenn Maßnahmen ohne Unterbrechung durchgeführt werden, hängt die Genauigkeit der GPS-gestützten Teilbreitenschaltung oft überwiegend von der relativen Positionsgenauigkeit des Sensors ab. Auch beim Parallelfahren ohne dauerhaft genutzte Spurmuster wird die relative Genauigkeit oft als Qualitätsmaß herangezogen.

Empfänger mit einer hohen absoluten Positionsgenauigkeit sind auch bei der relativen Messung der Position genau. Absolut ungenaue GNSS-Sensoren mit einer geringen absoluten Positionsgenauigkeit weisen jedoch eine teilweise erstaunlich hohe relative Genauigkeit auf. Dies gilt vor allem dann, wenn die Empfänger bewegt werden (siehe 4.2.4).

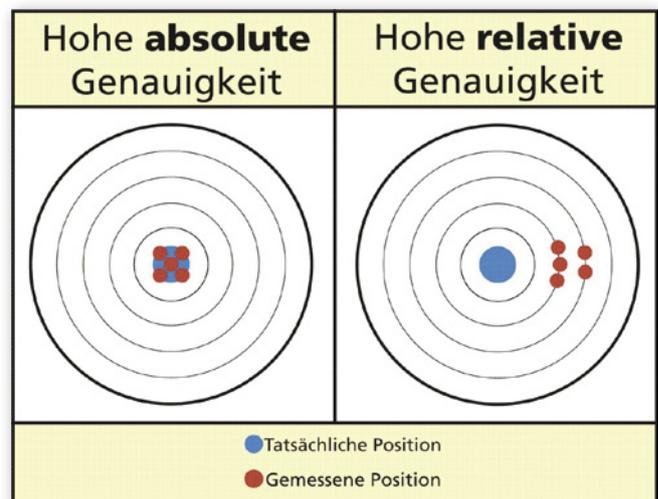


Abbildung 14: Absolute und relative Genauigkeit der Positionsbestimmung

4.2.3 Spur-zu-Spur-Genauigkeit

Die Spur-zu-Spur-Genauigkeit ist eine Sonderform der relativen Genauigkeit. Sie gibt den Genauigkeitskorridor neben einer Fahrspur an, der innerhalb von 15 Minuten nicht verlassen wird. Die Angabe 20 cm Spur-zu-Spur-Genauigkeit (2 RMS) bedeutet, dass ein Fahrzeug innerhalb von 15 Minuten 95%

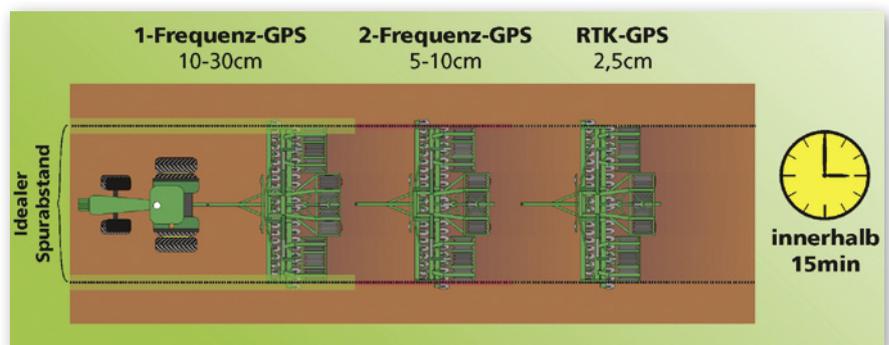


Abbildung 15: Spur-zu-Spur-Genauigkeit von Lenksystemen

der Zeit weniger als 20 cm von der Fahrspur abweicht. Anders ausgedrückt: wenn ein Fahrzeug nach 15-minütiger Parallelfahrt zum Ausgangspunkt zurückkehrt, weicht die Position in 95% der Fälle weniger als 20 cm von der Ausgangsposition ab.

Die Spur-zu-Spur-Genauigkeit findet ausschließlich bei Parallelfahr-, Lenkassistenten- und automatischen Lenksystemen Anwendung. Im englischen wird die Spur-zu-Spur-Genauigkeit als *pass-to-pass accuracy* bezeichnet.

4.2.4 Statische und dynamische Genauigkeit

Für die Bestimmung der Positionsgenauigkeit von GNSS-Sensoren reicht die statische Messung auf einem Punkt nicht aus. In der Bewegung fließen neben den Laufzeitmessungen auch die aus der Frequenzverschiebung der Satellitensignale („Dopplereffekt“) ermittelte Fahrgeschwindigkeit und Fahrtrichtung in die Positionsberechnung ein. Aus diesem Grund ist die in der Bewegung ermittelte Position oft genauer als die in der Ruhe bestimmte.

5. Korrekturdatensysteme für GNSS-Sensoren

Die Genauigkeit von GNSS-Sensoren wird durch ionosphärische Störungen, Uhren- und Bahnfehler begrenzt. Die aus den oben genannten Einflussfaktoren resultierenden Fehler bei der Positionsbestimmung können gemessen und für die Korrektur herangezogen werden. Dies ist dann möglich, wenn ein GNSS-Sensor ortsfest installiert wird und die auf Basis seiner exakt bekannten Position erwartete Laufzeit von Signalen mit den tatsächlichen vergleicht und Differenzen bildet. Einen solchen GNSS-Empfänger bezeichnet man als Basis- oder Referenzstation.

Die ermittelten Korrekturwerte werden als Laufzeitfehler bezeichnet. Wenn die von einer Referenzstation ermittelten Laufzeitfehler von einem zweiten GNSS-Sensor bei der Positionsmessung berücksichtigt werden, wird dies als differenziell korrigiertes GPS bzw. DGPS (bzw. DGNSS) bezeichnet.

Um differenzielle Korrekturen zu nutzen, muss nicht notwendigerweise eine eigene Referenzstation betrieben werden. Es stehen zahlreiche kostenlose und kostenpflichtige Korrekturdatendienste zur Verfügung.

5.1 Übertragung von Korrekturdaten

In der Regel erfolgt die Korrektur von Fehlern bei der Positionsbestimmung heute in Echtzeit (*real time*). Anfang der neunziger Jahre überwog noch das sogenannte Postprocessing Verfahren, bei dem Laufzeitmessungen parallel an der Referenzstation und den GNSS-Sensoren aufgezeichnet wurden. Die Korrektur erfolgte nach Abschluss der Aufzeichnung an einem PC.

Heute werden Korrekturdaten fast ausschließlich drahtlos von einer Referenzstation oder aus einem Netz von Referenzstationen übertragen. Die Übertragung erfolgt via Satellit, Datenfunk oder Mobilfunk.

Echtzeitkorrekturen wurden anfänglich ausschließlich mittels Datenfunk übertragen. Dabei wird und wurde das 433 MHz Band genutzt. Die Reichweite (max. 3 bis 5 km) ist durch die maximale Sendeleistung (in Deutschland 0,5 Watt) begrenzt. Die Funkübertragung im 433 MHz Band wird heute noch bei mobilen Referenzstationen eingesetzt. Wegen der geringen Reichweite und der hohen Störanfälligkeit durch andere Nutzer dieses Frequenzbandes hat es sich in der Landwirtschaft jedoch nicht durchsetzen können.

Ortsfeste Referenzstationen dürfen nach der Bewilligung durch die Bundesnetzagentur andere Frequenzbänder (448 MHz, 160 MHz) nutzen und dabei mit höheren Sendeleistungen (max. 6 Watt) senden. Da die Funkantennen häufig auf Gebäuden installiert werden, können so Reichweiten von 15 bis 20 km erreicht werden. Das Korrektursignal fester Referenzstationen ist zuverlässiger, weil die Frequenz nach Zuteilung durch die Bundesnetzagentur exklusiv genutzt werden kann.

Die Übertragung via Satellit bietet den Vorteil, dass große Gebiete flächendeckend versorgt werden können. Sie wird deshalb von vielen SBAS (Space Based Augmentation Systems) wie EGNOS, WAAS,

OmniSTAR und StarFire als Übertragungsmedium genutzt. Die Korrekturdaten einer einzelnen Station können für die Gebiete, die Satellitensignale abdecken, keine ausreichend genauen Korrekturen berechnen. Deshalb werden SBAS Korrekturdaten immer aus einem Netzwerk von Referenzstationen berechnet.

Der Nachteil bei der Übertragung mit Hilfe geostationärer Satelliten ist die Abschattung des Signals durch Hügel und Bäume. Nachdem die meisten Korrekturdatensatelliten nahe des Äquators stehen, erhöht sich die Wahrscheinlichkeit der Abschattung des Signals Richtung Norden deutlich.

In den letzten Jahren hat sich die Übertragung von Korrekturdaten über das Mobilfunknetz etabliert. Die Übertragung folgt hierbei dem sogenannten Ntrip Standard (Networked Transport of RTCM). Die Korrekturdaten können dabei von einer einzelnen Referenzstation bereitgestellt werden, die an das Internet angeschlossen ist. In der Regel werden die Daten jedoch aus RTK-Netzwerken erzeugt. Diese bestehen aus einem Verbund von Referenzstationen, die ihre Daten über das Internet an einen zentralen Server übermitteln. Jeder Nutzer erhält von dort nach der Anmeldung die Korrekturdaten einer für seinen Standort berechneten virtuellen Referenzstation.

Die Übertragung von Korrekturdaten über Mobilfunk ist grundsätzlich weniger zuverlässig als die Übertragung über Datenfunk. Sie hängt von der Abdeckung des Mobilfunknetzes und der zur Verfügung stehenden Bandbreite zusammen. In Regionen mit schlechter Mobilfunkabdeckung und/oder vielen Mobilfunknutzern kann die Zuverlässigkeit beeinträchtigt werden. Andererseits ist die Reichweite der Datenübertragung im Gegensatz zum Datenfunk nicht eingeschränkt.

Die Übertragung von Korrekturdaten über Mobilfunk ist grundsätzlich weniger zuverlässig als die Übertragung über Datenfunk. Sie hängt von der Abdeckung des Mobilfunknetzes und der zur Verfügung stehenden Bandbreite zusammen. In Regionen mit schlechter Mobilfunkabdeckung und/oder vielen Mobilfunknutzern kann die Zuverlässigkeit beeinträchtigt werden. Andererseits ist die Reichweite der Datenübertragung im Gegensatz zum Datenfunk nicht eingeschränkt.

5.2 Korrekturdatenformate

Korrekturdaten werden in Abhängigkeit vom Hersteller der Referenzstation in unterschiedlichen Formaten übertragen. GNSS-Sensoren unterscheiden sich in der Fähigkeit, diese unterschiedlichen Formate zu verarbeiten.

In den letzten Jahren haben sich zwei Formate durchgesetzt. Beim RTCM Format handelt es sich um einen internationalen Standard, vom dem allerdings unterschiedliche Versionen kursieren (2.1, 2.3, 3.0, 3.1). Die älteren Versionen des Standards sind nicht geeignet, um Korrekturen für das russische GLONASS System zu übertragen.

Der CMR Standard wurde von der Firma Trimble entwickelt und in Teilen freigegeben. Von diesem Standard existieren unterschiedliche Dialekte (CMR+, scrambled CMR). Neben dem CMR und RTCM

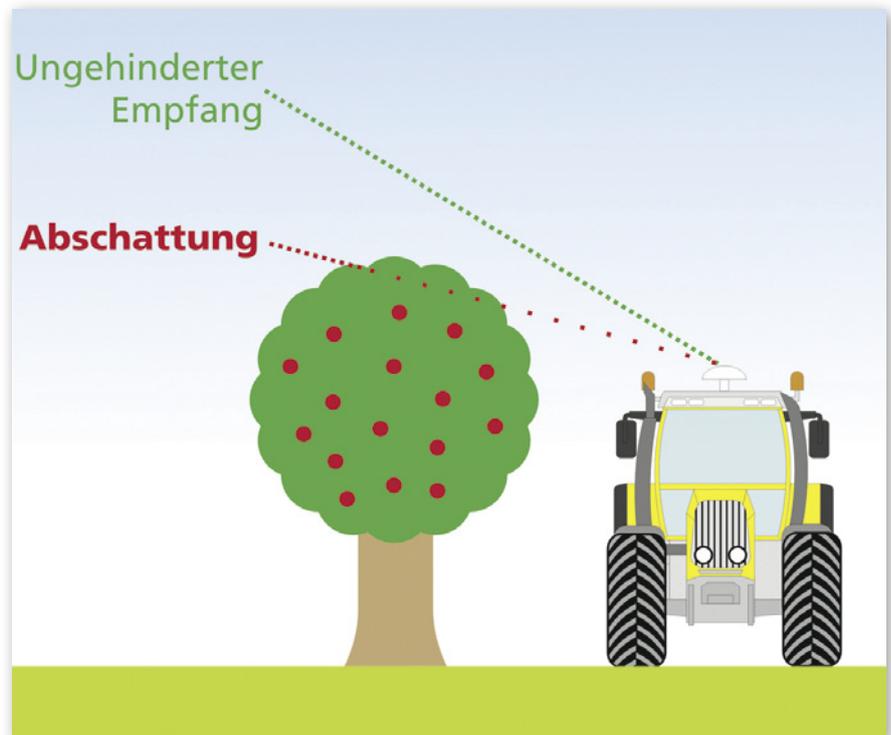


Abbildung 16: Abschattung von Satellitensignalen

Standard finden auch firmeneigene (proprietäre) Protokolle bei der Übertragung von Korrekturdaten Anwendung. Dies bedeutet, dass nur Referenzstationen und GNSS-Sensoren eines Herstellers zusammen eingesetzt werden können.

RTK-Netzwerke beherrschen in der Regel alle Standards und deren Dialekte. Feste Referenzstationen können in den meisten Fällen nur eines der beiden Formate ausgeben. Es werden vereinzelt auch Referenzstationen angeboten, die parallel RTCM und CMR Korrekturdaten erzeugen und übertragen können.

5.3 WAAS/EGNOS

In Amerika und Europa werden differenzielle Korrekturen von sogenannten Wide Area Augmentation Systems (WAAS) ermittelt und zur Verfügung gestellt. Das europäische WAAS ist besser als EGNOS bekannt. Die WAAS Systeme wurden ursprünglich mit dem Ziel entwickelt, die Zuverlässigkeit von GNSS zu überwachen. Diese Form der Qualitätssicherung dient der Erhöhung der Sicherheit von Luftfahrzeugen, die teilweise ausschließlich mit Hilfe von GNSS navigieren. Die WAAS Systeme werden auch als SBAS (Space Based Augmentation System) bezeichnet.

Alle WAAS Systeme bestehen aus GNSS-Referenzstationen, Bodenkontrollstationen und Satelliten für die Übertragung der Korrekturen. Die meisten handelsüblichen GNSS-Sensoren können WAAS Korrekturdaten ohne zusätzliche Antenne empfangen und verarbeiten.

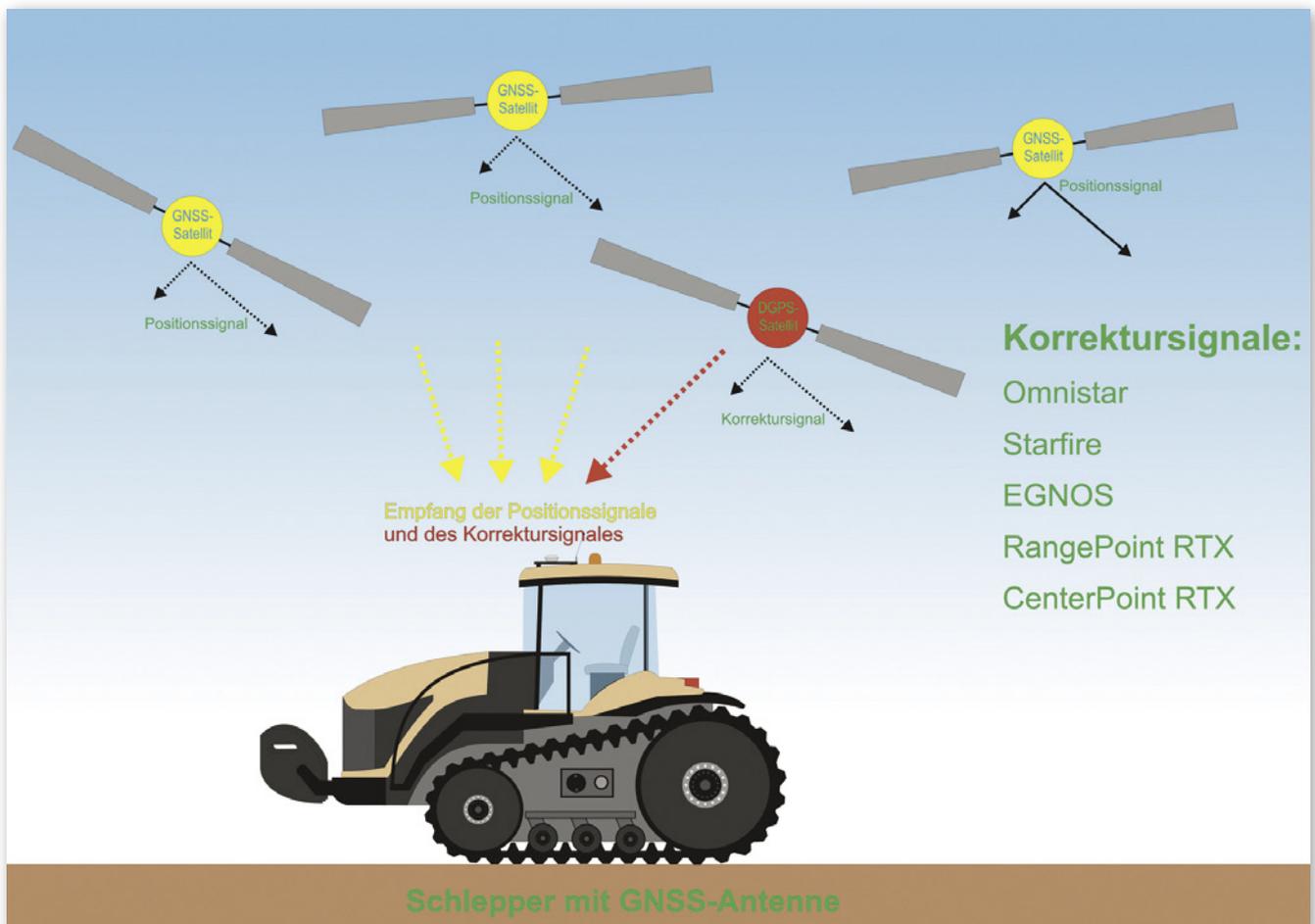


Abbildung 17: Satellitengestützte Korrektursignale

Da WAAS Systeme lediglich Korrekturen für eine GPS-Frequenz ausstrahlen, bleibt die Genauigkeit bei Nutzung von WAAS Korrekturen technisch auf 50 cm (2RMS) begrenzt.

Das EGNOS Korrektursignal wird von geostationären Satelliten ausgesendet. Im Gegensatz zu den GNSS-Satelliten ist ihre Position stabil. Ebenso wie andere Satellitensignale werden die Korrekturdatensignale von Erhebungen und vor allem Bäumen abgeschattet.

5.4 StarFire I

Beim StarFire I Korrekturdatenservice handelt es sich um einen Dienst, der im landwirtschaftlichen Bereich exklusiv von der Firma John Deere für seine Empfänger angeboten wird. Die Nutzung des Dienstes ist kostenlos. Voraussetzung für den Empfang sind ein StarFire iTC oder StarFire 3000 Empfänger. Die Korrekturdaten werden von Satelliten ausgesendet.

Die Spur-zu-Spur-Genauigkeit mit StarFire I Korrekturen wird mit 25 cm angegeben, die absolute Genauigkeit liegt im Bereich von ca. 1 m. Wie alle mittels Satelliten übertragenen Signale kann das StarFire I Signal – vor allem von Bäumen – abgeschattet werden.

5.5 Trimble Range Point RTX

Im Jahr 2013 hat die Firma Trimble den Range Point RTX Korrekturdatendienst eingeführt. Die Korrekturdaten für GPS und GLONASS werden via Satellit übertragen und können nur von Trimble Empfängern verarbeitet werden.

Mit dem Range Point RTX Korrekturdatendienst erreichen Empfänger eine Genauigkeit von 15 cm (Spur-zu-Spur, 2 RMS) bzw. 50 cm (absolut, 2 RMS). Der Dienst kann auf Jahresbasis für eine Gebühr von ca. 250 EUR abonniert werden. Wie andere Dienste ist vor allem in stark bewaldete Regionen die Abschattung des Signals möglich.

5.6 StarFire II

Die Firma John Deere bietet für ihre StarFire iTC und StarFire 3000 Empfänger einen satellitenbasierten Korrekturdatendienst an, der sowohl die beiden wichtigsten GPS-Frequenzen (L1/L2) und die Daten der GLONASS-Satelliten korrigiert.

Für das Erreichen der maximalen Genauigkeit muss eine Initialisierung erfolgen. Diese kann bis zu 30 Minuten dauern. Danach erreichen die Empfänger eine relative Genauigkeit von 5 bis 10 cm (2 RMS). Über die absolute Genauigkeit liegen unterschiedliche Angaben vor [8]. Die Kosten für eine StarFire II Jahreslizenz liegen im Bereich von 600 EUR. Das Signal kann auch monatsweise abonniert werden.

Im Gegensatz zu den weiter oben genannten Diensten bedient sich StarFire II des PPP Verfahrens (Precise Point Positioning). Hierbei werden die Daten eines weltweiten Netzes aus Referenzstationen gesammelt und dazu genutzt, um hochgenaue Korrekturen für die Uhren- und Bahnfehler zu berechnen. Zusätzlich werden die Fehler, die in der Atmosphäre entstehen, gemessen und flächendeckend modelliert.

Die Einschränkungen von PPP-Diensten im Allgemeinen und des StarFire II Dienstes im Speziellen liegen in den langen Initialisierungszeiten und der Empfindlichkeit gegenüber Signalabschattungen. Nach dem Einschalten dauert es 5 bis 45 Minuten bis die vom Hersteller angegebenen Genauigkeiten erreicht werden. Die Abschattung des Signals für mehrere Minuten kann dazu führen, dass dieser Prozess erneut durchlaufen werden muss.

5.7 OmniSTAR XP/HP/G2

Die Firma OmniSTAR bietet ein dem Star Fire II ähnlichen Korrekturdatendienst an [6]. Die OmniSTAR Dienste XP, HP und G2 werden ebenfalls mit Hilfe des PPP Verfahrens (s. 5.6, StarFire II) erzeugt. Der OmniSTAR HP Dienst deckt Zentraleuropa ab, der OmniSTAR XP Dienst ist auch in Osteuropa und Russland verfügbar. Der OmniSTAR G2 Dienst liefert im Gegensatz zu den anderen Diensten auch Korrekturen für die GLONASS Satelliten.

Die OmniSTAR Dienste können von verschiedenen GNSS-Sensoren (u. a. Trimble, Topcon) ohne zusätzliche Bauteile empfangen und verarbeitet werden. Die Preise für eine Jahreslizenz liegen im Bereich von 1.000 EUR (je nach Dienst). Die Korrekturen können auch monatsweise gebucht werden.

Ebenso wie beim Star Fire II Signal benötigen die GNSS-Empfänger nach dem Einschalten zwischen 15 und 45 Minuten um die volle Genauigkeit zu erreichen. Das Signal reagiert ebenso wie andere PPP Dienste empfindlich auf längere Abschattung in Richtung Süden. OmniSTAR gibt die Genauigkeit mit 5 bis 10 cm (2 RMS, Spur-zu-Spur) und 10 bis 20 cm absolut (2 RMS) an.

5.8 Trimble Center Point RTX

Beim Center Point RTX Korrekturdatendienst handelt es sich um eine dem Range Point RTX verwandte Technologie. Center Point RTX stellt eine Weiterentwicklung des PPP Verfahrens dar. Die Modelle für die Korrektur von Uhren-, Bahn- und atmosphärischen Fehlern wurden weiter verbessert. Zudem werden Informationen zur Polwanderung, dem Tidenhub und andere Faktoren mit einbezogen, die sich auf die Satellitensignale auswirken.

Die Center Point Korrekturdatendienste ermitteln im Gegensatz zu den PPP Verfahren auch Laufzeitfehler und löst wie feste Referenzstationen die Mehrdeutigkeiten beim Empfang der Trägerphase auf. Auch beim Center Point RTX Dienst ist eine Initialisierung erforderlich. Die Genauigkeit liegt danach bei 3,8 cm (2 RMS) und ist somit für viele landwirtschaftliche Anwendungen fast genauso gut geeignet wie RTK-basierte Korrektursysteme. Center Point RTX kann über Satellit oder Mobilfunk empfangen werden. Der Mobilfunkempfang empfiehlt sich vor allem dort, wie der Satellitenempfang durch Bäume abgeschattet werden kann.

Center Point RTX Korrekturen können nur von Trimble Empfängern verarbeitet werden. Die Empfänger benötigen für die Nutzung des Dienstes keine RTK-Freischaltung. Für den Empfang der über Satellit versendeten Daten sind keine zusätzlichen Bauteile notwendig. Für den Empfang über Mobilfunk wird ein Mobilfunkmodem benötigt.

Die Preise für Center Point RTX Korrekturen liegen bei 1.450 EUR für den Empfang über Satellitensignal und 1.090 EUR für den Empfang via Mobilfunk.

5.9 RTK-Referenzstationen (mobil und fest)

Bei RTK-Referenzstationen handelt es sich um GNSS-Sensoren, die statisch auf einem Punkt betrieben werden. Die Stationen berechnen aufgrund fest hinterlegter Koordinaten die durch Bahnfehler, Uhrenfehler und ionosphärischer Aktivität bedingten Fehler bei der Laufzeit- und Phasenmessung.

Mobile Referenzstationen werden in der Regel an einem Dreibein montiert und am Feldrand aufgestellt. Sie vermessen ihre eigene Position nach dem Einschalten. Da ihnen hierfür keine Korrekturdaten zur Verfügung stehen, kann die Referenzposition lediglich mit einem Fehler von +/- 1 m bestimmt wer-

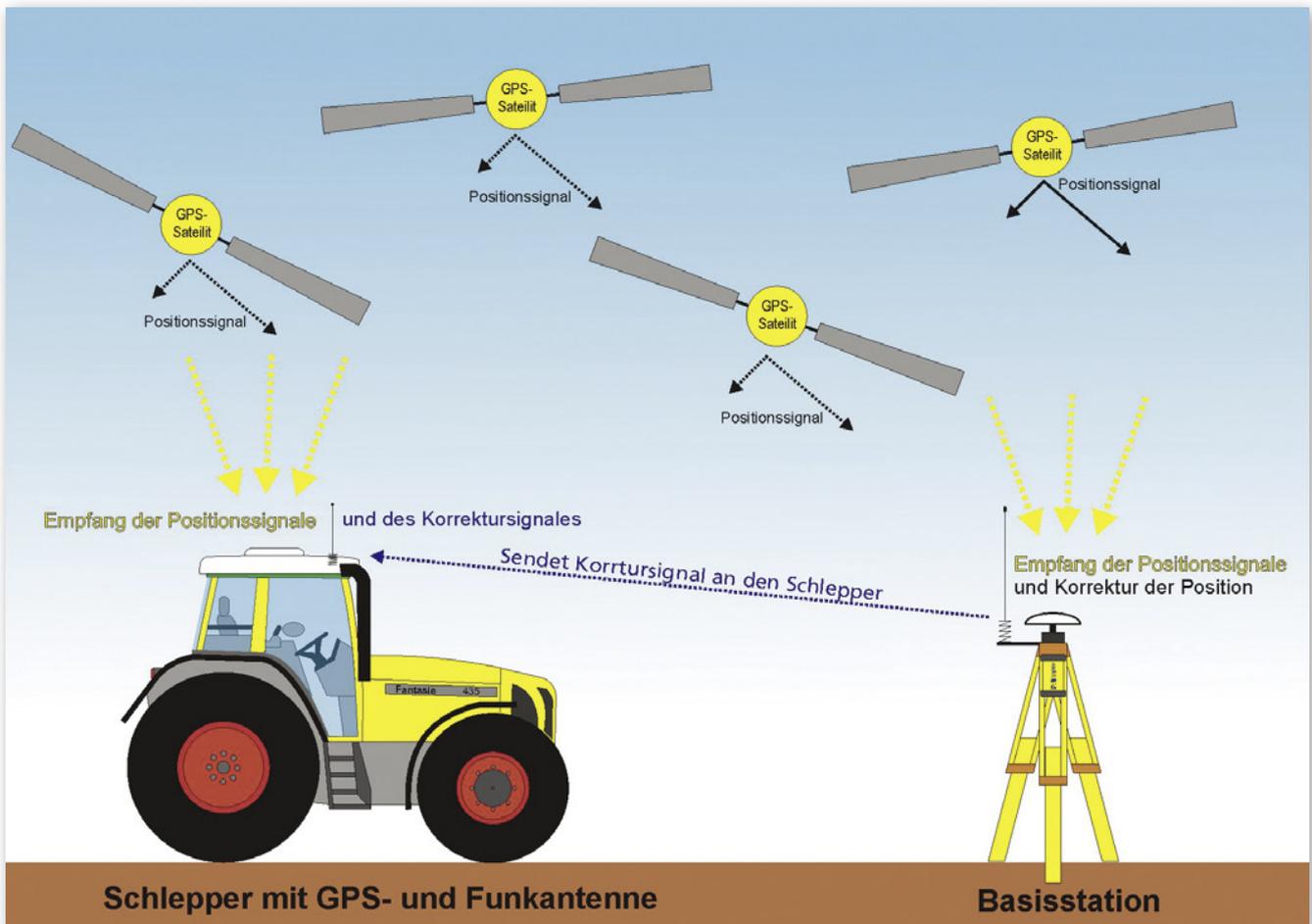


Abbildung 18: Satelliten- und Korrektursignalübertragung mit mobiler Referenzstation

den. Dieser Fehler überträgt sich systematisch auf die Sensoren, die die Korrekturdaten der mobilen Referenzstationen nutzen. Die relative Genauigkeit der Positionsbestimmung liegt jedoch trotzdem im Bereich von 2,5 cm.

Falls mobile Referenzstationen für die Positionsbestimmung an unterschiedlichen Terminen genutzt werden sollen, ist es unbedingt erforderlich, dass jeweils die gleichen Referenzkoordinaten verwendet und die Station an derselben Stelle aufgestellt wird. Idealerweise werden mobile RTK-Referenzstationen auf einem bekannten und amtlich eingemessenen Punkt aufgestellt und dessen Koordinaten in den Empfänger eingegeben. In diesem Fall können mit dem die Korrekturen nutzenden Roversystem absolute Genauigkeiten von 2,5 cm bei der Positionsbestimmung erzielt werden. Die Datenübertragung zwischen mobiler Referenzstation und Roversystem erfolgt in Deutschland ausschließlich als Datenfunk im Frequenzbereich 433 MHz. Die Sendeleistung ist auf 0,5 W begrenzt, sodass die Reichweite des Datenfunks unter idealen Bedingungen auf 3 km begrenzt ist. Das freie Frequenzband wird auch für andere Anwendungen genutzt und kann deshalb auf räumlich und zeitlich unvorhersehbare Weise gestört werden.

Feste Referenzstationen werden an/in Gebäuden installiert. Sie bestehen aus einem GNSS-Sensor, einem Funkgerät, einer GNSS-Antenne und einer Funkantenne. Die Datenübertragung erfolgt überwiegend in den Frequenzbändern 160 MHz (VHF) oder 448 MHz (UHF). Die Sendeleistung ist auf 6 W bzw. 5 W begrenzt, sodass die Reichweite in offenem und ebenem Gelände maximal 25 km beträgt.

Die Nutzung der oben genannten Frequenzen unterliegt der Genehmigung durch die Bundesnetzagentur. Der Vorteil der kostenpflichtigen Frequenzteilung ist, dass Störungen der Datenübertragung quasi ausgeschlossen sind.

Feste Referenzstationen produzieren über lange Zeiträume reproduzierbar konsistente Korrekturdaten. Es entsteht also nicht – wie bei der mobilen Referenzstation – ein durch den Auf- und Abbau bedingter Versatz. Nach guter fachlicher Praxis installierte Referenzstationen werden eingemessen, sodass bei Nutzung der Korrekturen die Position mit einer absoluten Genauigkeit von 2,5 cm (2 RMS) bestimmt werden kann.

Mobile Referenzstationen haben sich wegen der komplizierten Handhabung und der bedingten Fähigkeit, absolut gültige Korrekturen zu erzeugen, nicht durchgesetzt. Feste Referenzstationen kommen dort zum Einsatz, wo viele Fahrzeuge die Korrekturen einer Referenzstation nutzen können (Großbetriebe, Betriebsgemeinschaften) oder die Ansprüche an die Genauigkeit und Signalverfügbarkeit hoch sind (Sonderkulturen, Gemüse, Parzellenversuchswesen).

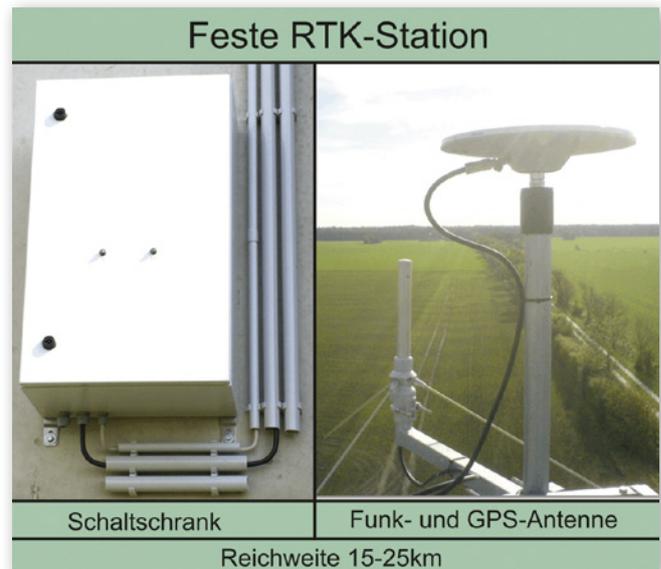


Abbildung 19: Feste Referenzstation

5.10 RTK-Netzwerke

RTK-Netzwerke bestehen aus einem Verbund von RTK-Stationen, die ihre Messwerte an einen zentralen Server übermitteln. Der Server stellt dem Empfänger für seine Position die Daten einer Virtuellen Referenzstation (VRS) zur Verfügung.

In der Regel erfolgt die Datenübertragung mittels Mobilfunk. RTK-Netzwerke haben den Vorteil, dass sich auch große Gebiete relativ kostengünstig mit Korrekturdaten versorgen lassen. Durch die Nutzung des vorhandenen Mobilfunknetzes werden ebenfalls Kosten gespart und die Bereitstellung der Daten erheblich vereinfacht.

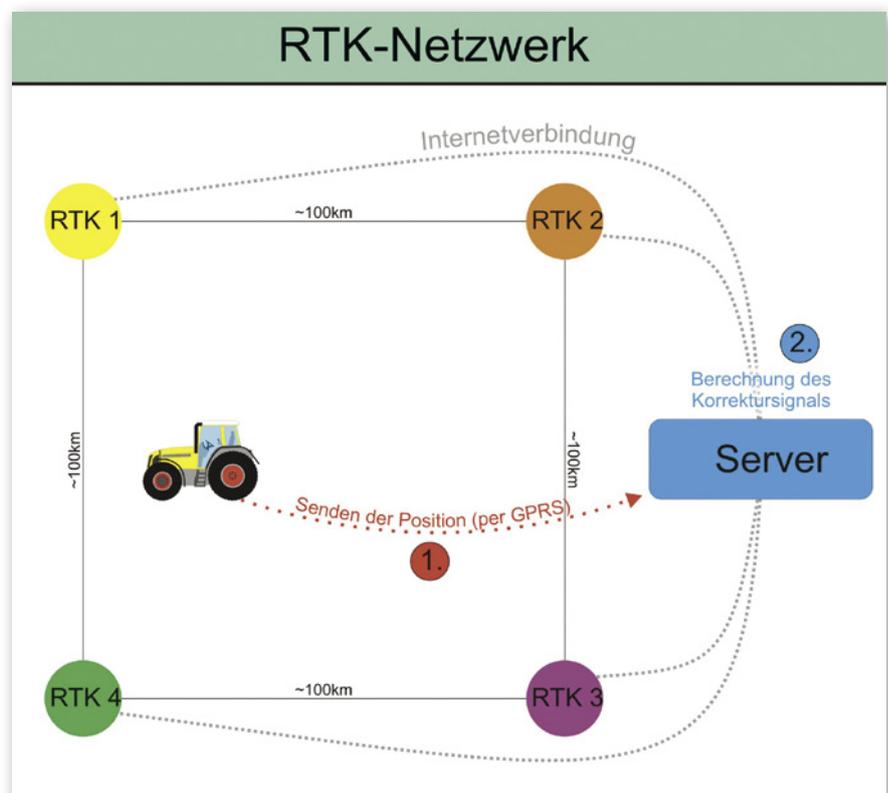


Abbildung 20: RTK-Netzwerk für Korrekturdatenübertragung via Mobilfunk

RTK-Netzwerke haben weiterhin den Vorteil, dass die Funktion des Netzwerks durch den Ausfall einer Station nicht oder nur unerheblich beeinträchtigt wird.

Der Nachteil von RTK-Netzwerken ist die Abhängigkeit vom Mobilfunknetz. In einigen Regionen ist die Ausstattung mit Mobilfunkmasten so weitmaschig, dass die erforderlichen Signalstärken unterschritten werden. Andererseits ist vor allem in der Nähe von großen Städten und Straßen die Belastung des Netzes durch Telefonate und mobilen Internetzugriffe so hoch, dass die Netze trotz hoher Signalstärke überlastet sind (geringe Bandbreite).



Abbildung 21: Schlepper mit automatischem Lenksystem (Quelle: www.progressive-agriculture.com und Claas)

Trotzdem hat sich die Nutzung von RTK-Netzwerkkorrekturen dort durchgesetzt, wo sie sinnvoll eingesetzt werden kann: Lohnunternehmer, Betriebe mit Splitterlagen, kleine Betriebe (wenige Betriebsstunden) machen sich die Tatsache zu Nutze, dass für die Nutzung von Netzwerkkorrekturen nicht in die Installation und den Betrieb einer eigenen Basisstation investiert werden muss.

Für Betriebe mit vielen Lenksystemen oder arrondierten Flächen ist eine eigene Referenzstation nach wie vor die sinnvollere Variante. Dies gilt vor allem dann, wenn die Ansprüche an Genauigkeit und Zuverlässigkeit hoch sind (Sonderkulturen, Dauerkulturen, Reihenfrüchte).

Die Kosten für Korrekturdaten aus Netzwerken liegen im Bereich von 850 EUR bis 1.500 EUR. In Deutschland können Landwirte aus einer großen Anzahl von Anbietern auswählen (VRS Now, Farm-RTK, AgCellent, Agravis-Net, LU-Net, MR-Net).

6. Einsatzgebiete von GNSS-Sensoren in der Landwirtschaft

6.1 Vermessung und Kartierung

Die Messwerte von GNSS-Sensoren können für die Vermessung von Punkten, Linien und Flächen verwendet werden. Hierbei werden die Positionen des Sensors von einem Programm gelesen, verarbeitet und gegebenenfalls gespeichert. Die Programme, in der Regel geografische Informationssysteme, stellen die gespeicherten Elemente auf dem Bildschirm in Form einer Karte dar. Meist können auch zusätzliche Geodaten (Luftbild, vorhandene Flächengrenzen) sowie die aktuelle Position des Empfängers angezeigt werden.

Die Vermessung von Punkten erfolgt als Kartierung von Grenzsteinen, Hydranten, Strommasten und anderen Hindernissen im Feld. Außerdem können die Positionen von Bodenproben oder Bonituren mit der Position verknüpft werden. Ein Beispiel für die Vermessung von Linien ist die Kartierung von Drainagen und Stromleitungen. Als Flächen werden Feldgrenzen und Feldstrukturelemente wie Hecken, Dolinen und Feldgehölze erfasst.

Durch Vermessung erfasste Elemente können im Büro in einem GIS oder einer Ackerschlagkartei mit GIS Funktion dargestellt, ausgewertet und bei der Planung von Maßnahmen berücksichtigt werden (z. B. Erstellung von Nährstoffkarten).

6.2 Parallelführung, Lenk- und Lenkassistenzsystem

Die am weitesten verbreitete Anwendung von GNSS-Sensoren ist die Parallelführung oder das automatische Lenken von Fahrzeugen. Meist wird hierbei der Anfangspunkt (A) und der Endpunkt (B) der ersten Fahrspur genutzt, um eine Referenzlinie zu erzeugen. Parallelführungs- und Lenksysteme berechnen zu dieser Linie basierend auf der Arbeitsbreite des Anbaugeräts parallele Linien. Die Systeme bestimmen danach fortlaufend den Spurfehler (die Abweichung von der Referenzlinie), zeigen ihn an oder greifen in die Lenkung des Fahrzeugs ein.

Neben einer geraden Referenzlinie (A, B) können meist auch Kurven, Vorgewende- oder Kreisregnerfahrspuren angelegt und für das Lenken genutzt werden. Bei den meisten Systemen ist es auch möglich, die Fahrspuren im Vorfeld in einem Programm zu planen.

Durch die Nutzung von Lenksystemen werden neue Formen der Bewirtschaftung ermöglicht. Eine Möglichkeit ist, die Bearbeitung des Feldes auf die Streifen zu beschränken, in denen die Pflanzen wachsen (Strip Till). Hierbei werden Bodenbearbeitung, Aussaat und Düngung räumlich so eingeschränkt, dass lediglich ein kleiner Teil der Fläche bearbeitet werden muss. Um die Streifen bei jedem Bearbeitungsgang möglichst genau abzufahren, ist in der Regel ein automatisches Lenksystem erforderlich. Bei der Umsetzung von Controlled Traffic Farming (CTF, Regelfahrspurverfahren) müssen Lenksysteme mit RTK-Genauigkeit eingesetzt werden. Das Ziel von CTF ist, dieselben Fahrspuren nicht wie bei Strip Tillage über eine Vegetationsperiode, sondern über mehrere Jahre hinweg dauerhaft zu nutzen. Das Ziel ist dabei die Verdichtung des Bodens zu minimieren, Erträge zu steigern, den Energieeinsatz zu reduzieren und die Befahrbarkeit der Fahrgassen durch fortlaufende Verdichtung zu verbessern.

6.3 Steuerung von Anbaugeräten

Die am weitesten verbreitete Nutzung von Satellitenortungssystemen bei der Steuerung von Anbaugeräten ist die Teilbreiten- oder Einzelreihenschaltung. Dabei werden aus der Position eines GNSS-Sensors und der Fahrtrichtung die Positionen einzelner Teilbreiten oder Reihen eines Anbaugeräts berechnet. Befindet sich eine Teilbreite oder das Bearbeitungsorgan (z. B. Säeschar) in einem Bereich der bereits bearbeitet wurde, wird die Teilbreite oder Reihe abgeschaltet. Dieses im englischen als *section control* bezeichnete Verfahren ist vor allem dann kostengünstig, wenn bereits ein Lenksystem mit GNSS-Sensor auf dem Fahrzeug verbaut ist. Die Kosteneinsparung ist vor allem bei großen Arbeitsbreiten und unförmigen Feldstücken erheblich.

Bei Anbaugeräten sind die Ausbringungsmengen oder die Bearbeitungsintensität einstellbar. Wenn Bedienterminal und Anbaugerät entsprechend ausgestattet sind, können auf dem Terminal Karten mit Sollwerten (Applikationskarten) hinterlegt werden. Beim Überfahren des Feldes wird die Ausbringungsmenge dann automatisch den in der Karte hinterlegten Sollwerten angepasst. Dieses Verfahren wird als VRA (variable rate application) oder teilflächenspezifische Mengenregelung bezeichnet. Ebenso wie bei der Teilbreitenschaltung ist die Umsetzung meist dann besonders kostengünstig, wenn bereits ein Lenksystem auf dem Fahrzeug vorhanden ist.

6.4 Dokumentation und Messwerterfassung

Neben der Steuerung und Regelung von Traktoren und Anbaugeräten können die Messwerte von GNSS-Sensoren (Position, Uhrzeit, Geschwindigkeit) auch für die Dokumentation von Maßnahmen genutzt werden. Dies ist insbesondere dann interessant, wenn sie mit anderen vorhandenen Informa-

tionen über den Zustand des Fahrzeugs oder des Anbaugerätes verknüpft werden (Dieselverbrauch, Motordrehzahl, Ertrag, Ausbringungsmengen).

Je mehr schlag- oder teilschlagspezifische Informationen über die Bewirtschaftung vorliegen, desto einfacher wird es, die Wirtschaftlichkeit von Maßnahmen zu analysieren und zu optimieren. Dies gilt insbesondere für die Ertragserfassung: Ertragskarten stellen die Erfolgskontrolle für die Summe aller auf einem Schlag durchgeführten Maßnahmen – von der Aussaat bis zur Ernte – dar.

Die Speicherung von Messwerten erfolgte bis vor wenigen Jahren ausschließlich auf der Maschine selbst. Die Übertragung der Daten auf einen PC erfolgte mit Hilfe von Datenträgern (PCMCIA-Karte, SD-Karte, USB-Stick). In letzter Zeit werden hierfür vermehrt Telemetrie-Systeme eingesetzt. Diese übertragen die Daten direkt nach der Erfassung oder nach Abschluss der Maßnahme über eine Mobilfunkverbindung auf einen Server und von dort gegebenenfalls auf einen PC. Der Vorteil von Telemetrie-Systemen liegt darin, dass die Datenübertragung erheblich vereinfacht wird und Daten in Echtzeit für die Planung von Logistikketten, die Einsatzplanung von Maschinen oder die Optimierung von Einstellungen herangezogen werden können. Zudem ist bei einigen Maschinen eine Ferndiagnose oder sogar eine Fernwartung über die Telemetrie-Schnittstelle möglich.

7. Literatur

- [1] Böttcher, Dirk (2005): Die grüne Revolution oder der Zauber aus den Bäumen, http://kontext.eon-ruhrgas.com/dateien/Wellness_fuer_Mutter_Erde.pdf
- [2] Dixon, Kevin (2007): StarFire™: A Global SBAS for Sub-Decimeter Precise Point Positioning, <http://www.navcomtech.com/Support/Download/StarFireGlobalSBASforSubDecimeterPrecisePointPositioning.pdf>
- [3] Leica (2000): Einführung in die GPS Vermessung (Global Positioning System), <https://www.fhtrier.de/fileadmin/groups/11/bauingenieurwesen/Personen/Lehmann/Vermessungstechnik/GPSBASIC.PDF>
- [4] NASA: Ionospheric and Atmospheric Remote Sensing, <http://iono.jpl.nasa.gov/>
- [5] NASA: IGS Products, GPS Satellite Ephemerides/Satellite & Station Clocks, <http://igsceb.jpl.nasa.gov/components/prods.html>
- [6] Visser, Hans (2009): OmniSTAR Satellite Services, http://www.omnistar.nl/downloads/articles/OmniSTAR_Satellite_Services.pdf
- [7] Rodrigo Leandro e. a (2011): RTX Positioning: The Next Generation of cm-accurate Real-Time GNSS Positioning, http://www.trimble.com/positioning-services/pdf/WhitePaper_RTX.pdf
- [8] Kevin Dixon, (2007), StarFire™: A Global SBAS for Sub-Decimeter Precise Point Positioning, <http://www.gdgps.net/system-desc/papers/starfire.pdf>
- [9] DLG, geo-konzept (2003): GPS-Empfänger Vergleich: Genauigkeit der statischen und dynamischen Positionierung, <http://www.dlg-test.de/pbdocs/5148F.pdf>

DLG-ANERKANNT. Qualität für die Praxis geprüft



GESAMT-PRÜFUNG
HERSTELLER
PRODUKT
DLG-Prüfbericht 0000



Erst informieren, dann investieren!

4.000 Prüfberichte online unter www.DLG-Test.de

www.DLG.org



Weitere DLG-Merkblätter zum Thema Technik Pflanzenbau

- DLG-Merkblatt 425
Getreide sicher lagern
- DLG-Merkblatt 390
**Optische Sensoren
im Pflanzenbau**
- DLG-Merkblatt 345
**Leitfaden für den Kauf
einer Landmaschine**
- DLG-Merkblatt 344
**Bodenschonender Einsatz
von Landmaschinen**



Download unter www.DLG.org/Merkblaetter



DLG e.V.
Mitgliederservice
Eschborner Landstraße 122 • 60489 Frankfurt am Main
Deutschland
Tel. +49 69 24788-205 • Fax +49 69 24788-124
Info@DLG.org • www.DLG.org