

Validierung der dynamischen Genauigkeit verschiedener GNSS-Empfänger

Margret Frischhut, Patrick Ole Noack

Die Präzision von RTK-GNSS-Empfängern (Real-Time Kinematic Global Navigation Satellite System) ist ein wichtiger Schlüssel für die Digitalisierung des Pflanzenbaus. Von größter Bedeutung ist dabei eine hohe dynamische Genauigkeit, für deren Bewertung geeignete Referenzsysteme erforderlich sind. Mit einem Machine-Vision-Ansatz und einer fixen Kreisbahn konnten die Messwerte sieben verschiedener GNSS-Sensoren in zwei Testszenarien (Geradausfahrt, Kurvenfahrt) miteinander verglichen und auf potenzielle Einflussfaktoren hin untersucht werden. Neben dem Referenzsystem haben die gefahrene Geschwindigkeit, die Anzahl der verwendeten Satelliten und der HDOP sowie die Tageszeit einen Einfluss auf die gemessene Genauigkeit. Die Unterschiede zwischen den dynamischen Genauigkeiten der untersuchten RTK-GNSS-Empfänger sind im landwirtschaftlichen Kontext zu vernachlässigen.

Schlüsselwörter

GNSS-Empfänger, dynamische Genauigkeit, RTK-Korrekturdaten, Satellitennavigation, Vergleichstest

GNSS-Empfänger sind zentrale Bestandteile einer modernen und digitalisierten Landwirtschaft. Eine exakte Positionsbestimmung bildet die Grundlage für das automatische Lenken von Landmaschinen und die Ansteuerung von Anbaugeräten (Mengensteuerung, Teilbreitenschaltung), wodurch Smart Farming und Precision Farming möglich werden. Für die Positionsbestimmung werden Globale Navigations-Satelliten-Systeme (GNSS) genutzt, die unter Verwendung von Real-Time-Kinematic(RTK)-Korrekturen eine Genauigkeit von 2,5 cm erreichen können. Dabei ist weniger die vergleichsweise leicht zu bestimmende statische Genauigkeit, sondern vielmehr eine zuverlässige Positionsbestimmung in der Bewegung von Bedeutung.

Letztere wird von zwei voneinander unabhängigen Messverfahren bestimmt: die Trilateration oder Laufzeitmessung zur Positionsbestimmung und der Dopplereffekt, mit dem die Geschwindigkeit und die Bewegungsrichtung ermittelt werden. Die Frequenz des empfangenen Signals ändert sich in Abhängigkeit von der relativen Bewegung der Antennen zu den Satelliten. Aus der Frequenzänderung kann mithilfe des Dopplereffekts die Relativgeschwindigkeit ermittelt werden. Aus den Relativgeschwindigkeiten zu allen empfangenen Satelliten wird die absolute Geschwindigkeit über Grund und die Bewegungsrichtung (Heading) ermittelt. Somit ist es möglich, aus der aktuellen Position, der Geschwindigkeit und der Bewegungsrichtung zukünftige Positionen zu schätzen. Der Schätzwert der Position wird im Rahmen von Filterverfahren dazu genutzt, um die nachfolgenden Positionen auf Plausibilität zu prüfen. Dabei werden meist sogenannte Kalman-Filter eingesetzt. Nachdem im Stillstand, also bei einer statischen Messung, der Dopplereffekt nicht für die Filterung von Positionen genutzt werden kann (keine Richtungsbestimmung möglich), ist zu erwarten, dass GNSS-Empfänger in Bewegung eine höhere Genauigkeit erreichen als im Stillstand. Entscheidend für die Steigerung

der Genauigkeit sind dabei sowohl die Qualität der Eingangsparameter als auch die Parametrierung der Filter (AGARWAL and O'KEEFE 2023).

Neben namhaften Herstellern von geodätischen RTK-GNSS-Empfängern haben sich in den letzten Jahren in diesem Produktsegment weniger bekannte Firmen am Markt etabliert. Diese haben kostengünstige GNSS-Sensoren entwickelt, die auch für das automatische Lenken, die positionsbezogene Ausbringung von Betriebsmitteln, die Teilbreitenschaltung sowie die Vermessung geeignet sind.

Vor diesem Hintergrund hat die Hochschule Weihenstephan-Triesdorf in Zusammenarbeit mit der Zeitschrift *profi* untersucht, wie sich die Genauigkeit verschiedener GNSS-Empfänger in der Bewegung unterscheidet. Dabei wurde die Spurgenauigkeit betrachtet, also die Abweichung von einer Solllinie quer zur Fahrtrichtung. Bei den Messungen wurden zwei Szenarien betrachtet: die Geradeausfahrt und die Kurvenfahrt.

Stand des Wissens

Untersuchungen zur dynamischen Genauigkeit von RTK-GNSS-Empfängern sind selten. Die Validierung mit einem geeigneten Referenzsystem stellt dabei die größte Herausforderung dar (KADĚRÁBEK et al. 2021).

Ein häufig verfolgter Ansatz ist der Vergleich mit einem bereits etablierten GNSS-Empfänger. Dass dies jedoch nicht immer ausreichend ist, zeigten beispielsweise JANOS et al. (2022). Bei einem Test zur dynamischen Genauigkeit eines kostengünstigen u-blox ZED-F9P-Empfängers (u-blox AG, Thalwil, Schweiz) wurde ein Leica GS18T-Empfänger (Leica Geosystems GmbH, München, Deutschland) als Referenz herangezogen. Dabei erzielte der getestete Empfänger jedoch teilweise bessere Ergebnisse als das Referenzsystem, was sich sowohl in der Stabilität des RTK-Status als auch durch visuelle Plausibilisierung zeigte.

2003 wurden verschiedene GNSS-Empfänger im Auftrag der Firma geo-konzept (geo-konzept GmbH, Adelschlag, <https://geo-konzept.de/>) auf ihre Genauigkeit getestet. Auf einem Prüfstand wurden die Sensoren auf einer fest definierten Kreisbahn bewegt und die Spurgenauigkeit verglichen. Der Test wurde auf der DLG-Prüfstelle für Landmaschinen in Groß-Umstadt durchgeführt. Dabei konnte die Genauigkeit mit einer Toleranz von ± 5 cm ermittelt werden (DLG 2003). Die Prüflinge nutzen bei diesem Versuch allerdings ausschließlich L1-Korrekturen oder PPP-Dienste (Precise Point Positioning) mit einer zu erwartenden Genauigkeit von ± 10 cm.

Um die Positionsgenauigkeit von RTK-GNSS-Sensoren zu testen, werden genauere Referenzsysteme benötigt, welche Abweichungen im Millimeterbereich erfassen können. Den Ansatz einer festen Kreisbahn griffen KADĚRÁBEK et al. (2021) auf. Mit einem eigens hierfür entwickelten Roboterarm wurde die dynamische Genauigkeit verschiedener RTK-Empfänger auf einer Kreisbahn mit 3 m Radius getestet. EASTERLY et al. (2010) entwickelten eine Methode, mit der die Spurgenauigkeit von zwei automatischen Lenksystemen untersucht wurde. Als Referenz diente ein Machine-Vision-Ansatz. Dazu wurden während der Überfahrt Bilder mit einer in der Mitte des Fahrzeugs angebrachten Kamera aufgenommen. Aus den Gradienten des Graustufenbildes wurde die relative Lage eines Seils im Bild ermittelt. Über die räumliche Pixelauflösung ließ sich die Abweichung des Traktors von der Sollspur berechnen. Easterly et al. konnten damit die Spurabweichung mit einer Toleranz von 2 mm bestimmen und setzte damit einen Standard, für die Bewertung von automatischen Lenksystemen.

Neben dem Referenzsystem haben auch andere Faktoren einen Einfluss auf die Genauigkeit bei der Positionsbestimmung. Dabei sind neben den Filtermethoden und deren Parametrierung insbe-

sondere die Anzahl der verwendeten Satelliten und deren Konstellation relevant. Darüber hinaus wirkt sich die Sonnenaktivität, die im Jahres- und Tagesverlauf variiert, auf die Ionosphäre und damit auf die Laufzeit der Satellitensignale aus. RTK-Korrekturdaten, wie der hier verwendete SAPOS HEPS, können die daraus entstehenden Fehler nicht vollständig korrigieren. GÜMÜŞ (2024) untersuchte den Einfluss der Tageszeit und drei verschiedener Korrekturdatenquellen auf die statische Genauigkeit eines GNSS-Empfängers der Firma Topcon. Dabei zeigte sich, dass beide Variablen sowohl die Genauigkeit als auch die Präzision der Empfänger beeinflussten. Insbesondere bei Nutzung von Korrekturdaten aus RTK-Netzwerken nahm die Genauigkeit während der Mittagszeit ab, wobei es bei allen Korrekturquellen zu unterschiedlich starken Abweichungen kam. Die FKP-Korrekturmethode (Flächen-Korrektur-Parameter) erzielte eine etwas höhere Genauigkeiten im Vergleich zur Methode der virtuellen Referenzstationen (VRS).

Material und Methoden

Testaufbau und Datenübertragung

Insgesamt wurden sieben verschiedene RTK-GNSS-Empfänger an sechs Testtagen zwischen dem 24.07.2024 und dem 01.08.2024 getestet. Eine Übersicht der Systeme und deren Eigenschaften sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Bei dem Test kam ein mobiler Agrarroboter als Trägerplattform zum Einsatz. Als gemeinsame Korrekturdatenquelle diente der SAPOS HEPS (Hochgenauer Echtzeitpositionierungsdienst, LDBV (2025)).

Tabelle 1: Spezifikation zu Antenne und Empfänger-Chipsatz der untersuchten RTK-GNSS-Empfänger (profi 2024)

	AGRA-GPS CRG	ArduSimple simpleRT- K2B	John Deere StarFire 7500	Raven RS 1	Reichhardt RGS700	Satcon-Sys- tem All in One 4G	Trimble NAV-900
Antenne	Emax Patch	u-blox Patch	Aero	Novatel	Novatel Vexxis	Harxon	Trimble Cy- clone
Empfänger- Chipsatz	u-blox F9P und D9S	u-blox F9P	John Deere	Novatel OEM7	Novatel OEM7	U-blox F9P	Trimble BD940
Kommunika- tion	4G-E-Modem, Bluetooth, USB, SD-Laufwerk	USB ¹⁾	CAN, USB, RS232	2 x RS232, 2 x CAN, WLAN, Bluetooth, Ethernet ²⁾	3 x RS232, 1 x CAN	4G-E-Modem plus SIM, RS232	Bluetooth, Ethernet, RS232, CAN
Übertragungs- standard	NMEA0183, NMEA2000, John Deere	NMEA0183	John Deere, NMEA0183	NMEA0183, NMEA2000	NMEA0183, NMEA2000	NMEA0183	NMEA0183, NMEA2000, Trimble
Kaltstartzei- ten Position/ RTK_fix	20 s/ 2 bis 5 min	25 s/35 s	80 s/140 s	k.A./ <5 min	40 s/60 s	15 s/45 s	k.A.
Maximale RTK-Über- brückung	4 min	k.A.	14 Tage ³⁾	20 min	20 min	3 min	5 min
IMU integriert	ja	nein	ja	ja	nein	ja	ja
Preis o. MwSt.	4.999 €	211 €	3.300 € ⁴⁾	8.500 € ⁵⁾	6.500 €	2.100 € ⁶⁾	3.500 €

Herstellerangaben, k.A. keine Angabe

¹⁾Optional mit Bluetooth, WiFi, CAN, RS232, 4G-E-Modem.

²⁾Optional integriertes Mobilfunk-Modem.

³⁾Mit RTK Extend.

⁴⁾Ohne RTK-Lizenz.

⁵⁾Mit Mobilfunk-Modem.

⁶⁾Inklusive 1 Jahr GSM-Freischaltung.

Die Empfänger waren auf einer aus Baustahl gefertigten Halterung (1,1 × 1 m) auf der Roboterplattform Tipard 350 (digital workbench GmbH, Wettstetten, <https://digital-workbench.de/>) montiert, die während der Testfahrten eine fixe Positionierung der Empfänger zueinander gewährleistete (Abbildung 1). Wie die Abbildung 1 zeigt, waren die GNSS-Empfänger über den gesamten Testzeitraum hinweg wie folgt angeordnet: von vorne betrachtet, von links nach rechts saßen auf der ersten Achse die GNSS-Empfänger von AGRA-GPS, Reichhardt und John Deere. Dahinter folgten in der Mitte der Empfänger der Firma Trimble und auf der linken Seite der ArduSimple-Empfänger, welcher ohne Gehäuse vergleichsweise klein ist. Auf der hintersten Achse ist in der Mitte der GNSS-Empfänger von Satcon und rechts der Raven-Empfänger befestigt.



Abbildung 1: a) Trägerrahmen mit RTK-GNSS-Empfängern (© Lea Obermaier), b) Trägerrahmen auf Trägerfahrzeug Tipard 350 (© Magnus Hofmann)

Damit hatten alle Sensoren die gleichen Voraussetzungen, sodass Messfehler weitgehend auf die Hard- und Software der GNSS-Sensoren zurückgeführt werden können. Da die Position der Antenne im Gehäuse der Empfänger von außen nicht eindeutig ersichtlich war, wurden am 12.07.2024 über zwei Stunden Messwerte statisch aufgezeichnet. Aus den Mittelwerten konnten die genauen Abstände zwischen den Antennen der GNSS-Sensoren berechnet werden (Abbildung 2). Die von den Empfängern mit einer Frequenz von 1 Hz erfassten NMEA-Daten wurden auf einen Laptop übertragen und über die Software Tera Term (Version 5.3 x86, Tera Term Project, 2004–2024 mit Tera Term Pro version 2.3, Copyright (C) 1994-1998 T. Teranishi, IPv6 extension version 0.81 (C) 2000 - 2003 Jun-ya KATO, Oniguruma 6.9.9 und SFMT 1.5.1, Japan, <https://teratermproject.github.io/>) und die Software u-center (u-blox AG, Thalwil, Schweiz) aufgezeichnet.

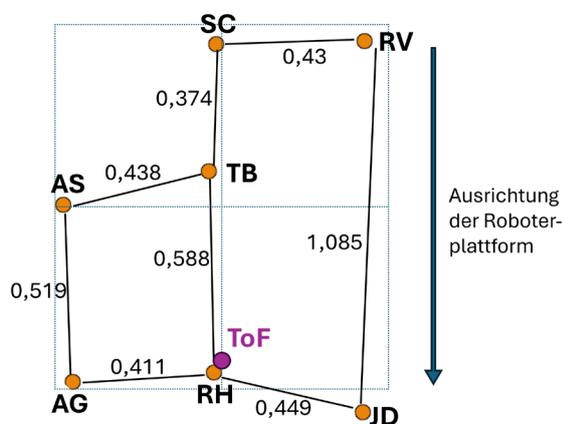


Figure 2: RTK-GNSS receiver layout (orange) and position of the Basler ToF-camera blaze-101 (purple) on the bracket (light blue) determined from the mean values of a two-hour static measurement on July 12th, 2024. ToF = Basler ToF-camera blaze-101, AS = ArduSimple simpleRTK2B, SC = Satcon All-in-One 4G, AG = Agra-GPS CRG, TB = Trimble NAV-900, RV = Raven RS1, RH = Reichardt RGS700 and JD = John Deere Starfire 7500

Um den Spurfehler der Empfänger bei der wiederholten Überfahrt zu ermitteln, muss der Roboter immer der gleichen Spur folgen. Für die Simulation einer Kurvenfahrt wurde er an einem Fixpunkt mit Schlupfen befestigt, wodurch die Empfänger auf einer fest definierten Kreisbahn bewegt wurden (Abbildung 3). Der Fixpunkt der Schlupfe lag an den innenliegenden Reifen, wobei sich der Roboter auf zwei verschiedene Arten bewegte: auf Vollspannung (Spur in Geradeausfahrt) sowie durch die Vorgabe von Geschwindigkeit und Lenkwinkel. Der Kurvenradius betrug 7,4 m. Um gleiche Bedingungen für alle Empfänger zu schaffen, wurden die Testfahrten sowohl im als auch gegen den Uhrzeigersinn durchgeführt und die Roboterplattform gedreht, wodurch sie sowohl in als auch gegen die Fahrtrichtung fuhr. Insgesamt ergaben sich dadurch 52 Testfahrten.



Abbildung 3: Testaufbau der Kurvenfahrt. Der Tipard der digital workbench GmbH wird über Schlupfe an einem Fixpunkt befestigt und damit auf einer fest definierten Kreisbahn gehalten; Fahrtrichtung auf dem Bild: im Uhrzeigersinn (© Kompetenzzentrum für Digitale Agrarwirtschaft (KoDA) der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf)

Als Referenz für die Untersuchung der Genauigkeit bei der Geradeausfahrt kam der Machine-Vision-Sensor-Ansatz von EASTERLY et al. (2010) zum Einsatz. Um den potenziellen Versatz des Fahrzeugs gegenüber der Sollfahrspur zu berücksichtigen, wurde ein 1,8 cm dickes Hanfseil entlang der vorge-

gebenen Spur auf dem Boden fixiert. Während der Fahrt erstellt eine nach unten gerichteten Basler Time-of-Flight(ToF)-Kamera des Typs blaze-101 (Basler AG, Ahrensburg) Bilder mit einer Frequenz von 1 Hz. Solange das Hanfseil exakt in der Bildmitte liegt, befindet sich der Tipard genau auf der Sollspur. Kommt es zu einem seitlichen Versatz der Testplattform, verschiebt sich die Bildmitte im Vergleich zur Referenzlinie (Abbildung 4). Durch die exakte Positionierung der Kamera im vorderen Teil der Mittelachse des Fahrzeugs und der bekannten Pixelauflösung konnte der Versatz quer zur Fahrtrichtung anhand der Lage des Seils im Bild mit einer theoretischen Genauigkeit von 3 mm bestimmt werden (Abbildung 4). Da die Pixelgröße mit zunehmender Abweichung zur Bildmitte zunimmt, wurde das System zunächst mit einem Kantholz mit bekannter Größe kalibriert. Nicht berücksichtigt wurde der Winkel zur Fahrspur, sodass wir bei der Auswertung von einem Fehler des Verfahrens von 1 cm ausgehen. Da die Referenzkamera im vorderen Teil des Tipards befestigt ist, könnte es insbesondere im hinteren Bereich der Testplattform zu Abweichungen kommen, wenn der Tipard leicht schräg auf der Sollspur fährt. Insgesamt erfolgten bei der Geradeausfahrt 43 Wiederholungen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten (2 km/h, 4 km/h, 6 km/h).

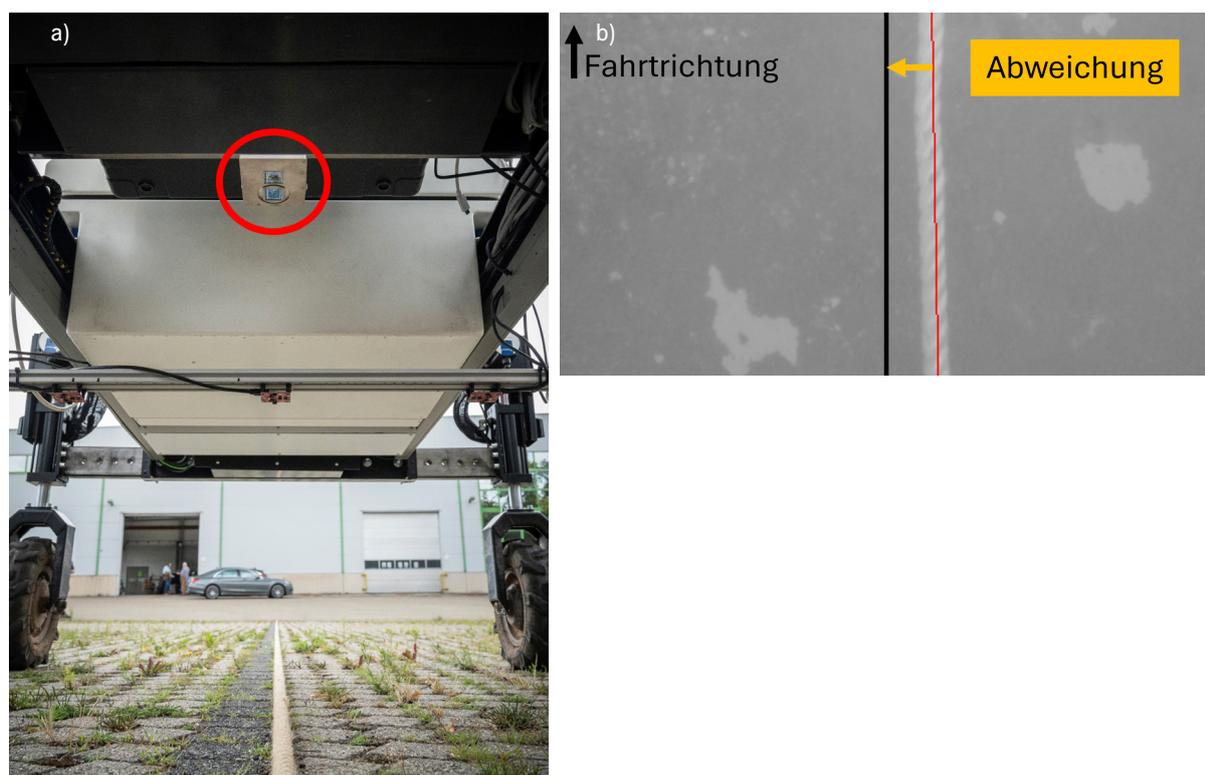


Abbildung 4: Referenzmethode der Geradeausfahrt; a) Position der Basler Time-of-Flight-Kamera (Typ blaze-101) am Trägerfahrzeug (roter Kreis) über dem als Referenzspur dienenden Hanfseil (© Farina Schildmann, Redaktion profi); b) Bildausschnitt der Basler Time-of-Flight-Kamera (Typ blaze-101); rote Linie = als Referenzspur dienendes helles Hanfseil, schwarze Linie = Bildmitte; die Abweichung der Testplattform zur Sollspur berechnet sich aus der Anzahl und der bekannten Größe der Bildpixel zwischen den beiden Linien (© Kompetenzzentrum für Digitale Agrarwirtschaft (KoDA) der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf)

Datenauswertung

Die bei der Geradeausfahrt aufgezeichneten Koordinaten wurden mit dem aus dem Kamerabild ermittelten Spurfehler verrechnet, um den durch den Versatz des Fahrzeugs bedingten Fehler zu korrigieren. Die Messpunkte der ersten Testfahrt dienten nach der Umwandlung in eine Linie als Referenz für die Ermittlung der Spurabweichung der folgenden Fahrten. Bei der Kurvenfahrt musste aufgrund der unterschiedlichen Aufnahmemethoden jeweils die erste Messung des jeweiligen Tages als Referenzfahrt herangezogen werden, wobei hier zwischen der Fahrtrichtung (im/gegen den Uhrzeigersinn, vorwärts/rückwärts) unterschieden wurde.

Um die Abweichung der aufgezeichneten Position von der Referenzspur zu quantifizieren, wurden statistische Kennzahlen berechnet. Neben Minimum, Maximum, Mittelwert, Standardabweichung und Median waren dies die 2,5 %, 25 %, 75 %- und 97,5 %-Quantile. Eine weitere relevante Kennzahl ist der Anteil der Datenpunkte innerhalb des Toleranzbereichs. Dieser entspricht dem Anteil aller aufgezeichneten Punkte, deren Abweichung maximal 3,5 cm beträgt. Der Grenzwert ergibt sich aus der von den Herstellern angegebenen Genauigkeit von $\pm 2,5$ cm und einem angenommenen Verfahrensfehler von ± 1 cm.

Im Anschluss wurde die absolute Abweichung der einzelnen Empfänger bewertet und grafisch als Boxplot dargestellt. Um Unterschiede hinsichtlich der Genauigkeit der Empfänger zu untersuchen, führten wir eine ANOVA mit anschließendem post-hoc-Test durch (Least significant difference test mit bonferroni-Korrektur aus dem Paket agricolae (DE MENDIBURU 2023)). Neben der Abweichung der Sensoren konnte auf diese Weise auch der Einfluss der Tageszeit untersucht werden. Hierzu mussten die Daten in die drei Gruppen Vormittag (09:00 bis 10:30 Uhr), Mittag (10:30 bis 14:00 Uhr) und Nachmittag (14:00 bis 15:30 Uhr) unterteilt werden. Weiterhin wurde der Einfluss weiterer Faktoren auf die absolute Abweichung mit einem multiplen linearen Modell untersucht. Als Parameter flossen das Empfängermodell, der Testtag, die gefahrene Geschwindigkeit, die Anzahl der Satelliten, der HDOP sowie die gefahrene Distanz zum Startpunkt in das Modell mit ein. Die Abweichung wurde mit python 3.13 (Python Software Foundation) berechnet. Alle weiteren Analysen erfolgten mit der Statistiksoftware R (v4.2.2; R Core Team, <https://www.r-project.org/>) in R Studio (Posit team, Boston, MA, <http://www.posit.co>) unter Verwendung der Pakete dplyr, agricolae, ggplot2 und sjPlot.

Ergebnisse

Spurgenauigkeit bei der Geradeausfahrt

Bei der Geradeausfahrt konnten über alle Testtage hinweg 4.930 Datenpunkte aufgezeichnet werden. Rund 96 % der Werte liegen im Toleranzbereich von $\pm 3,5$ cm Abweichung. Die mittlere Abweichung zur Referenzfahrt lag zwischen 0,6 cm (Raven RS1) und 1,2 cm (ArduSimple simpleRTK2B) (Tabelle 2), wobei Standardabweichungen von bis zu 2,1 cm (Raven RS1) beobachtet wurden. Der Median der Abweichung betrug zwischen 0,6 cm (John Deere Starfire 7500 und Raven RS1) und 1,0 cm (ArduSimple simpleRTK2B). Tendenziell kam es bei allen Empfängern zu einer positiven Abweichung (in Fahrtrichtung rechts), wie die Verteilung der Quantile in Tabelle 2 zeigen. Während der Testfahrten hatten alle Empfänger durchgehend den RTK-Status „fixed“, mit Ausnahme des Empfängers von ArduSimple, der bei 0,7 % (5 Messwerte) der aufgenommenen Daten in den RTK-Status „float“ wechselte. Der Wechsel des RTK-Status trat am 30.07.2024 bei zwei verschiedenen Testfahrten auf.

Tabelle 2: Statistische Werte der gemessenen Abweichung [m] der untersuchten RTK-GNSS-Empfänger auf der Geraden

	Agra-GPS CRG	ArduSimple simpleRTK2B	John Deere Starfire 7500	Raven RS 1	Reichhardt RGS700	Satcon All-in-One 4G	Trimble NAV-900
Min	-0,031	-0,034	-0,018	-0,069	-0,037	-0,052	-0,043
Max	0,099	0,101	0,070	0,078	0,051	0,059	0,082
Mittelwert	0,011	0,012	0,007	0,006	0,008	0,007	0,008
SD	0,012	0,012	0,008	0,021	0,010	0,015	0,014
Anzahl	753	711	777	723	548	684	734
Q_025	-0,009	-0,011	-0,009	-0,041	-0,014	-0,027	-0,018
Q_25	0,003	0,004	0,002	-0,002	0,003	0,001	0,002
Median	0,008	0,010	0,006	0,006	0,008	0,007	0,007
Q_75	0,017	0,018	0,011	0,015	0,014	0,015	0,013
Q975	0,044	0,038	0,023	0,053	0,028	0,043	0,049
RTK_fix in %	100	99,3	100	100	100	100	100
Anteil ± 3,5 cm in %	95,4	96,6	99,5	90,2	99,3	94,7	94,7

Min = Minimum, Max = Maximum, Mittelwert = mittlere Abweichung über alle Testfahrten, SD = Standardabweichung, Anzahl = Anzahl gemessener Datenpunkte, sowie vier relevante Quantile: Q_025, Q_025, Q_75 und Q_975 entsprechend dem 2,5 %, 25 %, 75 %- und 97,5 %-Quantil und der Median (50 %-Quantil). RTK_fix [%] = prozentualer Anteil an RTK-Status fixed. Anteil ± 3,5 cm = Anteil in % der Datenpunkte innerhalb der Toleranzgrenze von ± 3,5 cm

Die absolute Abweichung zur Referenzlinie weist nur geringfügige Unterschiede zwischen den untersuchten Empfängern auf (Abbildung 5). Besonders gut abgeschnitten hat der Starfire 7500 von John Deere: Nur 4 Datenpunkte liegen hier außerhalb des Toleranzbereichs. Beim RS1-Empfänger von Raven sind dagegen fast 10 % der Daten über oder unterhalb der Toleranzgrenze (Tabelle 2).

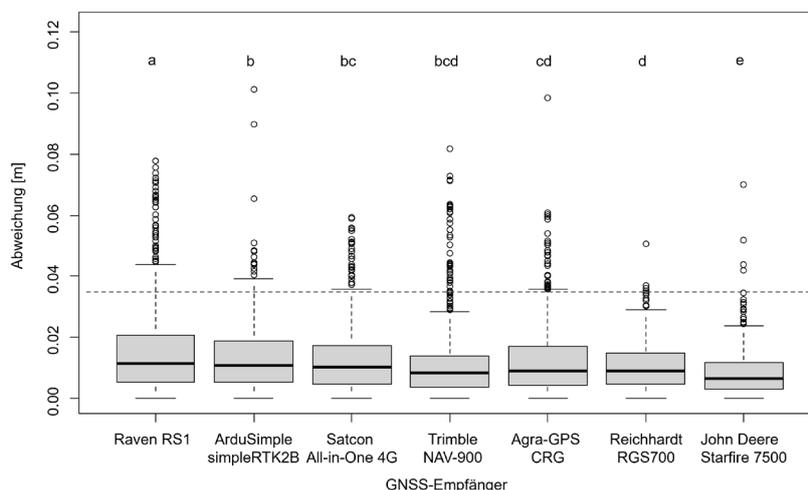


Abbildung 5: Absolute Abweichung der Position der Empfänger von der Referenzspur bei Geradeausfahrt

Während der Mittagszeit kam es zu signifikant höheren absoluten Abweichungen. Die geringsten Abweichungen konnten nachmittags beobachtet werden (Abbildung 6). Dabei lagen mittags 89,4 % aller gemessenen Daten innerhalb des Toleranzbereichs. Vor- und nachmittags lagen 97,2 bzw. 97,4 % im Toleranzbereich von 3,5 cm.

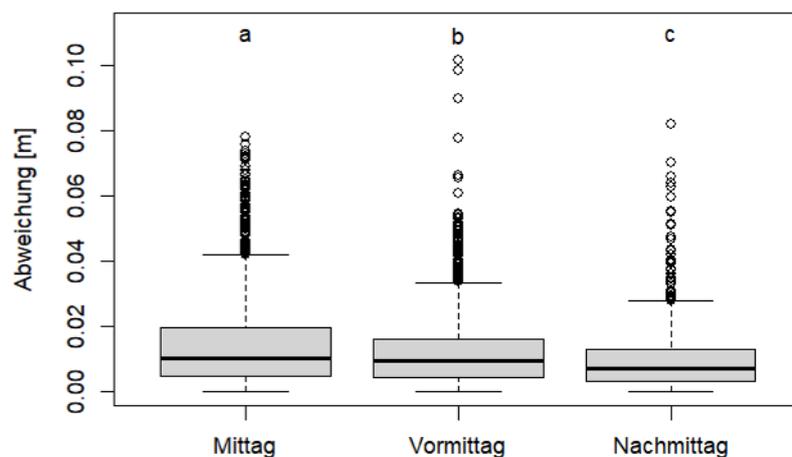


Abbildung 6: Absolute Abweichung der Position aller Empfänger von der Referenzspur bei Geradeausfahrt, gruppiert nach Tageszeit

Die im Regressionsmodell untersuchten Parameter konnten die absolute Abweichung nur zu einem kleinen Anteil erklären. Zwar zeigt die F-Statistik mit $F(14,4915) = 35,47$; $p < 0,001$ einen ausreichenden Erklärungsbeitrag des Modells, jedoch beträgt R^2 , das Maß für die Güte der Anpassung des Modells, lediglich 0,092 (adjustiertes $R^2 = 0,089$). Mit Ausnahme des HDOP zeigten alle untersuchten Parameter einen signifikanten Einfluss auf die gemessene Abweichung (Tabelle 3). Verglichen mit dem ersten Testtag wurde an allen anderen Tagen eine signifikant niedrigere absolute Abweichung ermittelt.

Tabelle 3: Testergebnis des multiplen linearen Regressionsmodells bei der Geradeausfahrt

Faktor	Schätzwert	Signifikanz
26.07.2024	-0,0037	***
29.07.2024	-0,0052	***
30.07.2024	-0,0037	***
01.08.2024	-0,0043	***
Geschwindigkeit	0,0003	*
Anzahl Satelliten	-0,0003	**
HDOP	0,0007	
Strecke	-0,0003	***

Der Schätzwert gibt den durchschnittlichen Wert an, mit dem sich die absolute Abweichung im Verhältnis zum untersuchten Faktor verändert: Für die metrischen Variablen Geschwindigkeit, Anzahl Satelliten, HDOP und Strecke bedeutet ein positiver Schätzwert eine Zunahme mit steigendem Wert des Faktors. Bei den Tagesvergleichen zeigt der Schätzwert die Veränderung im Hinblick auf den ersten Testtag (25.07.2024). Negative Werte bedeuten somit geringere absolute Abweichungen.
Signifikanzcode: $p < 0,0001 = ***$, $p < 0,001 = **$, $p < 0,01 = *$

Spurgenauigkeit in der Kurvenfahrt

Bei der Kurvenfahrt wurde eine im Vergleich zur Geradeausfahrt höhere Abweichungen ermittelt, jedoch liegen auch hier 92 % der 8.619 gemessenen Daten innerhalb des Toleranzbereichs von $\pm 3,5$ cm. Die mittlere Abweichung lag dabei zwischen $-0,2$ cm (Satcon All-in-One 4G) und $-0,7$ cm (Reichhardt RGS700). Im Vergleich zur Geradeausfahrt wurden größere Standardabweichungen von $\pm 1,9$ cm bis $\pm 2,3$ cm ermittelt. Insgesamt weisen die Daten eine höheren Abweichung nach außen auf (Tabelle 4).

Wie bei der Geradeausfahrt verlor der simple RTK2B-Empfänger von ArduSimple als einziger Empfänger das RTK-Signal für wenige Sekunden (< 0,2 %). Alle statistischen Daten zur Abweichung bei der Kurvenfahrt sind in Tabelle 4 zusammengestellt.

Tabelle 4: Statistische Werte der gemessenen Abweichung [m] der untersuchten RTK-GNSS-Empfänger auf der Geraden

	Agra-GPS CRG	ArduSimple simpleRTK2B	John Deere Starfire 7500	Raven RS1	Reichhardt RGS700	Satcon All-in-One 4G	Trimble NAV-900
Min	-0,130	-0,144	-0,119	-0,141	-0,185	-0,154	-0,138
Max	0,073	0,060	0,043	0,051	0,034	0,036	0,042
Mittelwert	-0,005	-0,004	-0,004	-0,004	-0,007	-0,002	-0,004
SD	0,021	0,021	0,021	0,022	0,019	0,019	0,023
Anzahl	1.250	1.250	1.244	1.248	1.128	1.249	1.250
Q_025	-0,051	-0,051	-0,047	-0,062	-0,045	-0,047	-0,058
Q_25	-0,018	-0,013	-0,016	-0,011	-0,018	-0,006	-0,013
Median	-0,002	-0,001	-0,001	0,001	-0,004	0,001	0,001
Q_75	0,010	0,010	0,011	0,009	0,006	0,008	0,011
Q975	0,028	0,029	0,026	0,023	0,023	0,021	0,027
RTK_fix in %	100	99,8	100	100	100	100	100
Anteil ± 3,5 cm	92,0	92,7	92,7	91,7	91,5	95,5	90,8

Min = Minimum, Max = Maximum, Mittelwert = mittlere Abweichung über alle Testfahrten, SD = Standardabweichung, Anzahl = Anzahl gemessener Datenpunkte sowie vier relevante Quantile: Q_025, Q_025, Q_75 und Q_975 entsprechend dem 2,5 %-, 25 %-, 75 %- und 97,5 %-Quantil und der Median (50 %-Quantil). RTK_fix [%] = prozentualer Anteil an RTK-Status „fixed“. Anteil ± 3,5 cm = Anteil in % der Datenpunkte innerhalb der Toleranzgrenze von ± 3,5 cm.

Der All-in-One 4G-Empfänger der Firma Satcon-System erzielte bei der Kurvenfahrt die besten Ergebnisse (Abbildung 7). Als einziger Empfänger liegen hier über 95 % der gemessenen Werte innerhalb des Toleranzbereichs. Die anderen Empfänger erreichten jedoch auch alle Werte über 90 % (Tabelle 4).

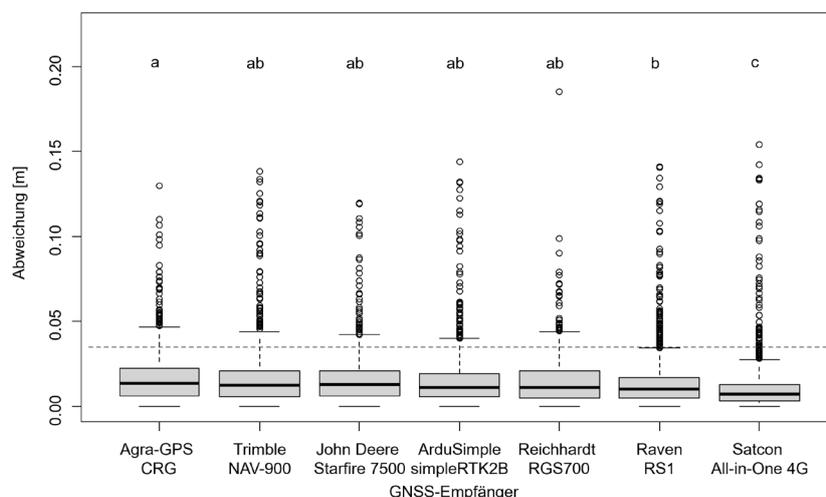


Abbildung 7: Absolute Abweichung der Position der Empfänger von der Referenzspur bei Kurvenfahrt

Insgesamt wurden mittags 7.542 Datensätze und vormittags 1.077 Daten erfasst. Am Vormittag kam es zu signifikant höheren mittleren Abweichungen als am Mittag, allerdings traten in der Mittagszeit größere Ausreißer auf (Abbildung 8). Der Anteil der Daten innerhalb des Toleranzbereichs lag in beiden Fällen bei 92 %.

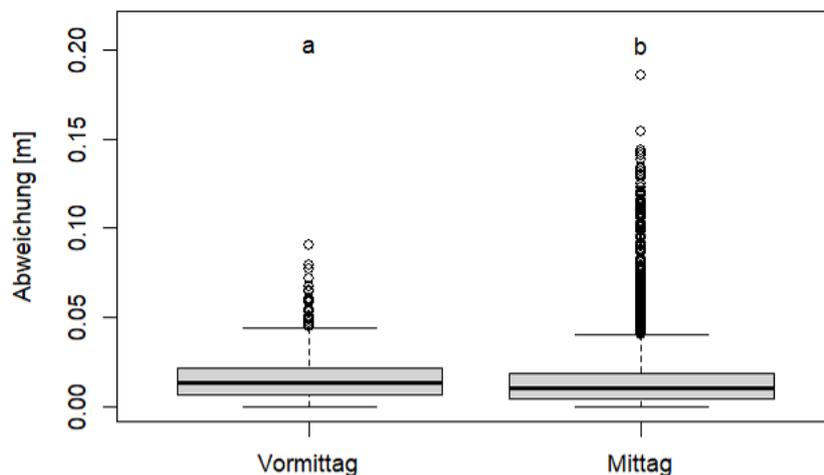


Abbildung 8: Absolute Abweichung der Position von der Referenzspur der Kurvenfahrt gruppiert nach Tageszeit

Das Regressionsmodell zeigte eine etwas höhere Güte der Anpassung an das Modell mit $R^2 = 0,1478$ (adjustiertes $R^2 = 0,1464$), bei einer F-Statistik von $F(14,8604) = 99,91$; $p < 0,001$. Die untersuchten Parameter konnten somit einen relevanten Erklärungsbeitrag für die Abweichung leisten, wobei alle Parameter einen signifikanten Einfluss aufwiesen (Tabelle 5). Eine höhere Genauigkeit wurde erzielt, je langsamer sich das Fahrzeug bewegt, je höher die Anzahl der Satelliten, je geringer der HDOP und je größer die Distanz zum Startpunkt war. Im Vergleich zum ersten Aufnahmetag wiesen die Daten des zweiten Tags leicht signifikant höhere Abweichungen auf. An den letzten beiden Tagen kam es dagegen zu hochsignifikanten Abweichungen.

Tabelle 5: Testergebnis des multiplen linearen Regressionsmodells bei der Kurvenfahrt

Faktor	Estimate	Signifikanz
25.07.2024	0,0022	*
26.07.2024	- 0,0010	
30.07.2024	0,0114	***
01.08.2024	0,0046	**
Geschwindigkeit	0,0045	***
Anzahl Satelliten	- 0,0007	***
HDOP	0,0062	**
Strecke	- 0,0009	***

Der Schätzwert gibt den durchschnittlichen Wert an, mit dem sich die absolute Abweichung im Verhältnis zum untersuchten Faktor verändert: Für die metrischen Variablen Geschwindigkeit, Anzahl Satelliten, HDOP und Strecke bedeutet ein positiver Schätzwert eine Zunahme mit steigendem Wert des Faktors. Bei den Tagesvergleichen zeigt der Schätzwert die Veränderung im Hinblick auf den ersten Testtag (24.07.2024). Negative Werte bedeuten somit geringere absolute Abweichungen.
 Signifikanzcode: $p < 0,0001 = ***$, $p < 0,001 = **$, $p < 0,01 = *$

Diskussion

Beim Vergleich der dynamischen Genauigkeit verschiedener RTK-GNSS-Empfänger konnten keine, für die landwirtschaftliche Praxis relevanten Unterschiede zwischen den Sensoren festgestellt werden. Vielmehr zeigte sich, dass in beiden Testszenarien sowohl die Empfänger der etablierten Hersteller als auch die kostengünstigen Modelle die von den Herstellern angegebene Genauigkeit einhielten.

Die Ergebnisse zeigen auch, wie wichtig ein geeigneter Testaufbau zur Untersuchung der Genauigkeit von RTK-GNSS-Sensoren ist. Mit den verwendeten Methoden konnten plausible Ergebnisse erzielt werden. Es gibt jedoch Hinweise darauf, dass die Methodik noch optimiert werden kann. Bei dem kamerabasierten Ansatz zur Bestimmung des Spurfehlers wird die Abweichung des Fahrzeugs von der Sollspur im vorderen Bereich des Fahrzeugs erfasst. Da ein Gieren des Fahrzeugs unberücksichtigt bleibt, könnte es bei weiter vom Drehpunkt des Fahrzeugs entfernt sitzenden Empfängern zu Abweichungen gekommen sein, die nicht auf den Sensor zurückzuführen sind.

Auf dieses Problem deutet beispielsweise die höhere Abweichung des Raven-RS1-Empfängers hin. Dieser hatte den größten Abstand zum Referenzpunkt (Abbildung 2). Eine Verdrehung des Fahrzeugs zur Sollspur um ein Grad hätte beispielsweise zur Folge, dass der Raven-Empfänger 2,3 cm von seiner ursprünglichen Position abweicht. Ebenfalls deutlich betroffen wären die Empfänger von der Firma Satcon und ArduSimple, deren Ergebnisse bei der Geradeausfahrt ebenfalls etwas ungenauer waren als die der anderen Prüflinge. Insgesamt ermöglicht der Machine-Vision-Sensor-Ansatz eine präzise Testmöglichkeit für die Spurgenaugigkeit. Dabei sollte jedoch die Distanz zum Referenzpunkt beachtet werden. Neben dem seitlichen Versatz des Tipards, sollte zukünftig der Winkel der Testplattform zur Fahrspur (Gierwinkel) bei der Auswertung bestimmt und berücksichtigt werden.

Auch bei der Kurvenfahrt könnte der Testaufbau ursächlich zu Ungenauigkeiten beigetragen haben. Zwar wurden die Schlupfe auf voller Spannung gehalten, dennoch sind von der Kreisbahn abweichende Bewegungen durch wechselnde radiale Kräfte auf die Räder möglich. Ein starres System, wie es von KADĚRÁBEK et al. (2021) entwickelt wurde, kann diese Fehlerquelle ausschließen.

Wie bereits GÜMÜS (2024) zeigte, konnten wir einen Einfluss der Tageszeit auf die Genauigkeit der GNSS-Empfänger feststellen und zur Mittagszeit tendenziell höheren Abweichungen nachweisen. Das könnte mit einer höheren Sonnenaktivität zusammenhängen. Diese wirkt sich auf die Ionosphäre und damit auf das Satellitensignal aus. Der TECU (Total Electron Content Unit) ist ein Maß für die Sonnenaktivität. Bei zunehmender elektromagnetischer Strahlung steigt die Anzahl der freien Elektronen in der Ionosphäre an, wodurch das Satellitensignal abgelenkt wird.

Die Trimble Terrasat GmbH stellt die TECU-Werte digital auf der Plattform GNSS Planning Online, Version 1.8.0.0 zur Verfügung (Trimble Inc., Colorado, USA). Während der Testtage wurden die höchsten TECU-Werte am Mittag gemessen. Einzige Ausnahme ist der 25.07.2024, an dem die höchsten Werte bereits gegen 10 Uhr erreicht wurden (TECU = 42,5). Der Vergleich der durchschnittlichen TECU-Werte im Untersuchungszeitraum zeigt, dass am 25.07.2024 die stärkste Sonnenaktivität herrschte (TECU = 38,9 während der Geraden; 41,2 während der Kurvenfahrt). Die geringsten TECU-Werte wurden jeweils am 26.07.2024 (Kurve: 25,5; Gerade: 25,1) gemessen. Möglicherweise sind somit die höheren Abweichungen am 25.07.2024 bei der Geradeausfahrt auf die höhere Sonnenaktivität zurückzuführen. Bei der Kurvenfahrt scheint dagegen der Einfluss des TECU geringer zu sein, als andere Faktoren, welche auf den Testaufbau zurückzuführen sind.

Die insgesamt sehr guten Ergebnisse der getesteten GNSS-Sensoren zeigen, dass die aktuell marktverfügbaren Empfänger auch in der Bewegung durchgehend gute Ergebnisse erzielen. Grundsätz-

lich ist aber zu beachten, dass die hier durchgeführten Tests nicht die Bedingungen im Feldeinsatz widerspiegeln. Durch eine erhöhte Schlupfwirkung der Reifen, insbesondere bei nassen Bedingungen, wie auch Unebenheiten, können ruckartige Positionsveränderungen entstehen. Wie präzise die GNSS-Sensoren diese verarbeiten oder kompensieren können, wäre in einem Feldversuch zu klären.

Darüber hinaus war die Teststrecke in diesen Untersuchungen recht kurz. Die Strecke von 17 m bei der Geradeausfahrt reichte beispielsweise nicht aus, um die Maximalgeschwindigkeit von 6 km/h zu erreichen. Darüber hinaus wurde die Zielgeschwindigkeit nur über einen kurzen Zeitraum gehalten. Die signifikante Zunahme der Abweichung mit zunehmender Geschwindigkeit, lässt vermuten, dass bei höheren Geschwindigkeiten noch größere Abweichung auftreten könnten. Weitere Untersuchungen sollten deshalb einen längeren Streckenabschnitt vorsehen und mögliche weitere Faktoren, wie den Einfluss der Beschleunigung und des Abbremsens, beachten. Die Änderung der Geschwindigkeit und der Bewegungsrichtung kann sich über die Kalmanfilterung auf die Positionsgenauigkeit auswirken, je nach Wichtung der tatsächlichen Positionsmessung aus der Trilateration und der aus Geschwindigkeit und Richtung prognostizierten Position.

Schlussfolgerungen

Wir konnten zeigen, dass sowohl etablierte als auch neue, kostengünstige RTK-GNSS-Sensoren die Herstellerangaben bezüglich der horizontalen Genauigkeit eingehalten haben. Die marginalen Unterschiede sind kaum praxisrelevant und mit hoher Wahrscheinlichkeit auf den Testaufbau und durch Variationen in den Umgebungsbedingungen (Ionosphäre, Uhrenfehler, Ephemeridenfehler etc.) zurückzuführen.

Literatur

- Agarwal, N.; O'Keefe, K. (2023): Use of GNSS Doppler for Prediction in Kalman Filtering for Smartphone Positioning. *IEEE Journal of Indoor and Seamless Positioning and Navigation*, pp. 1–10, <https://doi.org/10.1109/JISPIN.2023.3337188>
- Gümüş, K. (2024): Studying the Repeatability of Measurements Obtained via Network Real-Time Kinematic Positioning at Different Times of the Day. *Ingeniería e Investigación* 44(1), e105622, <https://doi.org/10.15446/ing.investig.105622>
- DLG (2003): GPS-Empfänger Vergleich – Genauigkeit der statischen und dynamischen Positionierung. DLG-Prüfbericht 5148F, Anmelder: geo-konzept
- Easterly, D.; Adamchuk, V. I.; Hoy, R. M.; Kocher, M. F. (2010): Testing of RTK-Level Satellite-Based Tractor Auto-Guidance Using a Visual Sensor System. In: 2nd International Conference on Machine Control & Guidance Proceedings, March 9–11, 2010, pp. 29–36, Bonn, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Landwirtschaftliche Fakultät, IGG - Institut für Geodäsie und Geoinformation Biological, <https://hdl.handle.net/20.500.11811/1399>
- Janos, D.; Kuras, P.; Ortyl, Ł. (2022): Evaluation of low-cost RTK GNSS receiver in motion under demanding conditions. *Measurement* 201, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111647>
- Kaděrábek, J.; Shapoval, V.; Matějka, P.; Kroulík, M.; Kumhála, F. (2021): Comparison of Four RTK Receivers Operating in the Static and Dynamic Modes Using Measurement Robotic Arm. *Sensors* 21(23), <https://doi.org/10.3390/s21237794>
- LDBV (2025): SAPOS Dienste. <https://ldbv.bayern.de/produkte/dienste/sapos.html>, Zugriff am 11.07.2025
- de Mendiburu, F. (2023): agricolae: Statistical Procedures for Agricultural Research. R package version 1.3-7, <https://doi.org/10.32614/CRAN.package.agricolae>
- profi (2024): Vergleichstest RTK-GNSS-Empfänger: Low-Cost contra High-End. *profi* 12, S. 88–93 <https://www.profi.de/magazine/12-2024-32569.html>, Zugriff am 11.07.2025

Autoren

Margret Frischhut ist wissenschaftliche Mitarbeiterin und **Prof. Dr. Patrick Ole Noack** ist Leiter des Kompetenzzentrums für Digitale Agrarwirtschaft an der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, Markgrafenstraße 16, 91746 Weidenbach.
E-Mail: patrick.noack@hswt.de

Danksagungen

Unser Dank gilt der Zeitschrift profi, insbesondere Frau Anja Böhrnsen, die den GNSS-Vergleichstest initiiert und die Zusammenarbeit mit den Herstellern tatkräftig unterstützt hat. Besonderer Dank gilt auch den Studierenden der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf Ruben Berger, Moritz Heidelberg, Magnus Hoffmann und Lea Obermaier, die in einem Studierendenprojekt den Testaufbau entwickelt, mit großem Engagement umgesetzt und erste Testfahrten durchgeführt haben. Danken wollen wir auch den Kollegen vom Kompetenzzentrum für Digitale Agrarwirtschaft der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf Peter Hopf, Sascha Fast und Alexander Wabro, die durch ihre tatkräftige Unterstützung zum Gelingen des Tests beigetragen haben. Unser herzlicher Dank gilt insbesondere auch den Firmen für die Bereitstellung der GNSS-Empfänger für den Test und ihre hervorragende Unterstützung bei der Umsetzung.