

# WHITEPAPER

## Trimble ProPoint Verfahren

Zentimetergenaue Positions- und  
Orientierungsdaten der nächsten Generation

15. Januar 2024

Das Trimble® ProPoint® GNSS-Verfahren das in verschiedenen Trimble GNSS-Empfängern integriert ist, zeichnet sich durch Spitzenleistung in anspruchsvollen GNSS-Umgebungen aus. Das System bietet bahnbrechendes Messmanagement, das die neuesten Entwicklungen bei der Fusion von GNSS- und Inertialsensoren nutzt. In diesem White Paper gehen wir näher auf diese branchenführende Technologie ein.



## Einführung

1992 brachte Trimble den weltweit ersten kommerziellen GPS-Empfänger (Global Positioning System) auf den Markt, der eine zentimetergenaue Echtzeitkinematik-Positionierung (RTK) ermöglichte. Bei diesem System der ersten Generation mussten Anwender den Rover zum Initialisieren des Systems zwar über einem bekannten Punkt platzieren, doch für Vermessungsingenieure war dies revolutionär, da topografische Kartierungen, Absteckungen und Bestandsvermessungen in Echtzeit möglich wurden. Folgeanwendungen wie Baumaschinensteuerung und Präzisionslandwirtschaft führten zu Positionierungsmodulen, die schnelle On-the-Fly-Initialisierungen, hohe Aktualisierungsraten und Positionen mit geringer Latenz lieferten. Dieses technische Whitepaper bietet einen Überblick über das Trimble ProPoint GNSS-Modul. Diese fünfte Generation des RTK/RTX-Moduls für Präzisionsdaten wurde entwickelt, um Positions- und Orientierungsdaten aus der Fusion von GNSS-Signalen, weltweiten Korrekturdatendienste und Messdaten verschiedenster Sensoren zu liefern.

# Systemarchitektur

## Unterstützung der neuesten Konstellationen und Frequenzen

Das Weltraumsegment des weltweiten globalen Navigationssatellitensystems (GNSS) wird ständig mit neuen Satellitengenerationen modernisiert. Diese neuen Signale verbessern zwar die Leistung der Anwenderausrüstung, stellen jedoch eine Herausforderung für die Hersteller von Empfängern dar, die die Struktur der neuen Signalübertragungen unterstützen müssen. Trimble-Empfänger, die über Trimble Maxwell™ 7 und ProPoint-Technologie verfügen, können von allen aktuellen GNSS-Signalen profitieren, die auf allen Frequenzen übertragen . Dazu gehören:

- **GPS:** L1 C/A, L1C, L2E, L2C, L5
- **GLONASS:** L1 C/A, L1P, L2P, L2 C/A, L3 CDMA
- **Galileo:** E1, E5A, E5B, E5AltBOC, E6
- **BeiDou:** B1C, B1i, B2i, B2A, B2B, B3i
- **QZSS:** L1 C/A, L1S, L2C, L5, LEX
- **IRNSS:** S1 C/A, L5
- **SBAS:** L1 C/A, L5
- **MSS:** Trimble RTX, OmniSTAR

Die ProPoint-Technologie kann alle verfügbaren Signaleingänge nutzen, sofern ein RTK- Basisempfänger Korrekturen für dieselben Signale sendet. Dies hat zu einer flexibleren und genaueren Lösung in ungünstigen GNSS-Umgebungen geführt. Die ProPoint-Technologie ermöglicht außerdem ein flexibles Signalmanagement, das die Auswirkungen von Signalverschlechterungen abmildert und ein GNSS konstellationsunabhängiges Arbeiten gestattet. Wenn z. B. einzelne Frequenzen und Konstellationen verfälscht bzw. blockiert werden, kann der Empfänger weiterhin die Positionsbestimmung anhand der verfügbaren Messungen vornehmen.

## Enge Kopplung von IMU-Daten mit RTK und RTX

Das ProPoint-Verfahren wurde von Grund auf mit Blick auf Trägheitsnavigation und Sensorfusion entwickelt. Die GNSS-Rohdaten werden zusammen mit den Gyroskop- und Beschleunigungssensordaten zu einer einzigen Positions- und Orientierungslösung kombiniert. Die inertiale Messeinheit (IMU) ist bei den meisten Produkten eine Eigenentwicklung, die auf derselben Platine wie der GNSS-Empfänger untergebracht ist. Diese enge Integration bietet eine robuste Lösung, mit der die Vorteile von GNSS und Trägheitsnavigationssystem (INS) maximiert werden.

## Großer Filter und genaue Modellierung aller Fehlerquellen

Aufgrund der Fortschritte im GNSS-Signalspektrum und im Low-Power-Mobile-Computing wurde ProPoint mit einem verbesserten Ansatz bei der Datensignalfilterung entwickelt. Durch die Kombination aller Messungen zu einem einzigen Filter und die gleichzeitige Schätzung der ganzzahligen Trägerwellenmehrdeutigkeiten mit einem erweiterten Satz von Filterzuständen wird eine optimale Lösung erreicht. Dieser Ansatz ist zwar rechenintensiver, bietet aber die flexibelste Nutzung aller verfügbaren GNSS-Signale.

Als Ergebnis dieses neuen Ansatzes bei der Signalfilterung können alle verfügbaren Signale für die RTK-Positionslösung verwendet werden, da eine Vielzahl herkömmlicher Methoden überflüssig geworden sind, die auf Signalkombinationen basieren. Obwohl Zweifrequenzdaten erforderlich sind, um atmosphärische Effekte auf GNSS-Signale bei der RTK-Positionsbestimmung zu berücksichtigen, bedeutet die verbesserte Filtertechnologie, dass der Prozessor für eine optimale Lösung jedes oder alle Signale verwenden kann, einschließlich einzelner Signale in sehr ungünstigen Tracking-Umgebungen.



## Auf verschiedene Anwendungen abgestimmte dynamische Modelle

Bei dem ProPoint-Verfahren können Anwender aus einem dynamischen Modell wählen, was jeweils am besten zu ihrer Anwendung passt. Anhand von Daten, die in einer Vielzahl von Anwendungen gesammelt wurden, wurden Modelle erstellt, die als Input für das Modul verwendet werden.

## StabilesSchätzungsverfahren zur Erkennung von Ausreißern

Das ProPoint-Verfahren identifiziert in den empfangenen Eingabedaten Messungen, die nicht mit einem stochastischen Modell übereinstimmen. Bei jeder Messung, die nicht mit dem stochastischen Modell übereinstimmt, weist das Modul die Messung entweder zurück, passt das der Messung zugeordnete stochastische Modell an oder korrigiert die Messung. Die Methode ermöglicht in der Regel eine präzise Positionsschätzung auch bei Messungen, die einen oder mehrere Ausreißer enthalten.

## Verfahren der Positionsbestimmung

ProPoint unterstützt eine Vielzahl von GNSS- und GNSS/INS-Verfahren der Positionsbestimmung. Hierzu gehören die folgenden Verfahren:

- **Präzise Positionsbestimmung:** GNSS-SBAS, GNSS-DGNSS, GNSS-RTK, GNSS-RTX
- **Präzise Positionsbestimmung mit Orientierung:** GNSS/INS-SBAS, GNSS/INS-DGNSS, GNSS/INS-RTK, GNSS/INS-RTX

Abhängig von der Verfügbarkeit von differentiellen Korrekturen wechselt das Verfahren elegant in einen anderen Positionsbestimmungsmodus, um eine unterbrechungsfreie Positionsbestimmung zu gewährleisten.

## Integrierter RTK-xFill-Dienst

Wenn bei Funkausfällen der Korrekturdatenstrom der Referenzstation nicht verfügbar ist, um herkömmliche RTK mit einer einzelnen Referenzstation oder einem Netzwerk virtueller Referenzstationen (VRS) zu unterstützen, bietet der Trimble xFill® Korrekturdienst die geeignete Technologie, um die Positionsbestimmung für kurze Zeit mit Zentimetergenauigkeit fortzusetzen. Dadurch werden nicht nur Aussetzer bei der Positionsbestimmung vermieden, sondern auch kurze Abstecher in Bereiche ermöglicht, die vom Referenzfunksignal verdeckt, aber für die GNSS-Konstellationen noch sichtbar ist. Um eine zentimetergenaue Positionsbestimmung mit GNSS-Signalen zu erreichen, bietet Trimble xFill einen spezifischen Korrekturdatenstrom, der über L-Band-Satelliten ausgestrahlt und mit der Trimble RTX® Technologie (Real-time extended) erzeugt wird.

Die Trimble xFill-Technologie kann RTK-Positionen mit einer ähnlichen Präzision wie herkömmliches differentielles RTK bereitstellen, da sie dieselbe Fehlerquelle minimiert. Die Verzerrungen der Satellitenuhr, der Umlaufbahn und der Messungen, die bei der Standard-RTK-Verarbeitung durch Differenzbildung aufgehoben werden, werden modelliert und als Teil des Trimble RTX-Korrekturdatenstroms übertragen.

Diese Effekte werden dann zu bekannten Größen und können bei der Verarbeitung der Rover-Messungen angemessen berücksichtigt werden. Die atmosphärischen Fehler werden durch eigens für das Trimble RTX-System entwickelte Algorithmen ausgeglichen, die Resteffekte auf ein für hochpräzise GNSS-Positionierungsanwendungen akzeptables Maß reduzieren. Somit bietet die gesamte Trimble RTX-Datenverarbeitung eine Modellierung der Restfehler der Satellitenbeobachtungen, die mit denen vergleichbar ist, die mit RTK erreicht werden.

### **Effiziente Nutzung der CPU-Kapazität von modernen Plattformen**

Mit zunehmender Anzahl von GNSS-Signalen steigt auch die für die Verarbeitung aller Messungen erforderliche Rechenleistung. Für diese Problemstellung hat Trimble Empfängerplattformen mit optimierten Prozessoren und dem neuesten Trimble Maxwell 7 GNSS ASIC (Application-Specific Integrated Circuit) entwickelt. Folglich können die Positionen mit minimaler Latenz an die Steuersysteme übermittelt werden, während zugleich der Gesamtstromverbrauch reduziert wird.



## **Vorteile des Trimble ProPoint-Verfahrens**

Zu den Vorteilen des ProPoint-Positionierungsmoduls in verschiedenen Anwendungen gehören die wichtigen Werttreiber Genauigkeit, Verfügbarkeit und Integrität.

Viele Positionierungssysteme bieten einige dieser Merkmale, aber das ProPoint-Verfahren liefert die erforderlichen Positions- und Orientierungsdaten, um Ihr Projekt wirklich erfolgreich zu machen. In direkten Vergleichstests mit dem RTK/RTX-Modul der Vorgängergeneration in anspruchsvollen GNSS-Umgebungen, z. B. in der Nähe von und zwischen Bäumen sowie in bebauten Umgebungen, schnitt das ProPoint-Verfahren **mindestens 30 % besser ab, und zwar bei einer Vielzahl von Faktoren**, einschließlich der Zeit zum Erreichen der Zentimetergenauigkeit, der Positionsgenauigkeit und der Zuverlässigkeit der Messung.

## Genauigkeit

Seit mehr als 20 Jahren profitieren Führungs- und Steuerungsanwendungen unter freiem Himmel von der Zentimetergenauigkeit von RTK. Bedauerlicherweise gibt es bei den meisten autonomen Anwendungen in der realen Welt anspruchsvolle Umgebungen, in denen die Sichtlinie der Satelliten beeinträchtigt sein kann. Bäume, Gebäude, Brücken und andere Hindernisse blockieren und reflektieren eingehende Signale. ProPoint liefert im reinen GNSS-Modus mit flexilem Signalmanagement und einem optimalen Einzelfilteransatz zentimetergenaue Ergebnisse unter Baumkronen.



Hier konnten bisher bestenfalls Genauigkeiten im Dezimeterbereich erzielt werden. Bei Anwendungen, bei denen die freie Sicht zum Himmel oftmals verdeckt ist, bietet die Integration von IMU-Messungen im Modul die beste Lösung. Das ProPoint-Verfahren integriert die verfügbaren GNSS- und IMU- Messungen und liefert bei diesen Ereignissen Genauigkeits- und Orientierungsdaten im Zentimeterbereich.

Die Latenz der berechneten Ergebnisse ist außerdem ein wichtiger Faktor beim autonomen Fahren. Eine Position kann sehr genau sein, aber wenn sie verzögert ist, ist ihr Wert für die Systemleistung und Sicherheit nur gering. Das ProPoint-Modul liefert Positions- und Orientierungsdaten mit einer Latenzzeit von weniger als 20 Millisekunden bei Aktualisierungsraten von bis zu 100 Hz.

## Verfügbarkeit

Trimble strebt schon seit langem an, für alle Arten von Anwendern überall zentimetergenaue Präzision zu liefern. Wenn unsere Kunden auch in ungünstigen Umgebungen effizient arbeiten können, erweitert dies das Spektrum möglicher Anwendungen und bietet den Anwendern dieser Technologie eine deutlich bessere Rentabilität.

ProPoint liefert im reinen GNSS-Modus und im GNSS/INS-Modus eine Genauigkeit im Zentimeterbereich unter dichten Baumkronen und in städtischen Hochhausumgebungen, in denen herkömmliche Systeme Schwierigkeiten haben würden. Auch Straßen- und Geländefahrzeuge, die in der Nähe von Gebäuden oder unter Brücken fahren, erreichen eine nahezu 100%ige Verfügbarkeit von Positions- und Orientierungsdaten.

Anwender, die im RTK-Modus arbeiten, profitieren von der integrierten xFill-Technologie, die ein unterbrechungsfreies Weiterarbeiten bei Ausfall der Korrekturdatenquelle ermöglicht. Dies bedeutet eine erhöhte Verfügbarkeit im Vergleich zu RTK-Nutzern, die keine PPP-Technologie (Precise Point Positioning) einsetzen, um den Verlust von Korrekturen der lokalen Referenzstation zu überbrücken.

## Integrität

Genaue Präzisionsschätzungen sind für die zentimetergenaue Steuerung von autonom fahrenden Maschinen von entscheidender Bedeutung. Anwendungen sind auf diese horizontalen und vertikalen Indikatoren angewiesen, damit sicher ist, wann auf die Positions- und Orientierungsdaten tatsächlich Verlass ist. Eine falsche Schätzung kann zu Schäden am Endprodukt, an der Ausrüstung oder schlimmstenfalls sogar zu Verletzungen führen.

Umfangreiche Tests von ProPoint in einer Vielzahl von Umgebungen weltweit haben zu Schätzungen geführt, die die Vorteile der verbesserten Rauschmodelle und der Fähigkeit, diese Modelle an verschiedenste Umgebungen anzupassen, genau widerspiegeln.

## Bewährte Effizienz

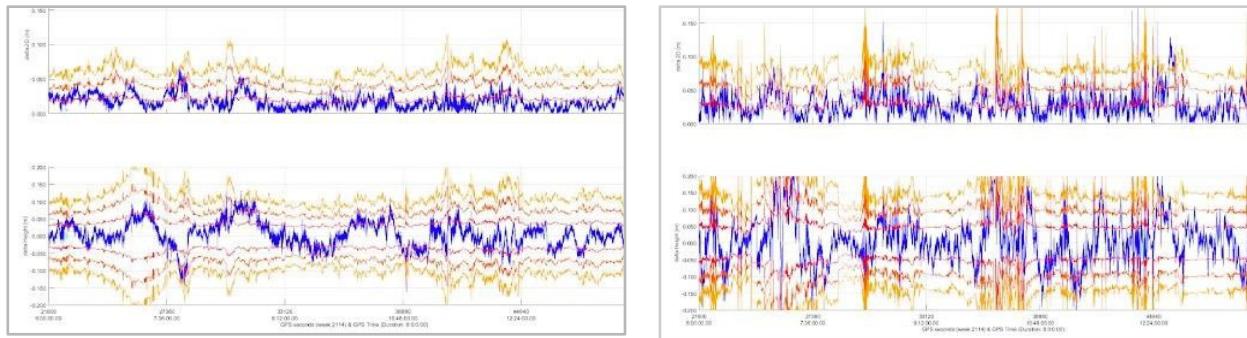
Um die Effizienz von ProPoint zu bewerten, war es für das Team von entscheidender Bedeutung, Feldtests durchzuführen, die den realen Alltagsherausforderungen der Kunden möglichst genau entsprechen sollten. Zu diesem Zweck führte Trimble eine umfangreiche Testkampagne durch, bei der weltweit verschiedene Teststrecken genutzt wurden, die jeweils unterschiedliche Umgebungen mit üblichen GNSS-Hindernissen wie Bäumen und Gebäuden umfassten. Nachfolgend finden Sie Beispiele von reinen GNSS-Tests und GNSS/INS-RTK-Tests, bei denen die Vorgängergeneration des Systems mit dem ProPoint-System verglichen wurde. Ähnliche Ergebnisse werden in RTX-Verfahren erzielt.

## GNSS-Leistungsfähigkeit

Das Trimble ProPoint-Verfahren bietet eine überragende GNSS-Leistung in widrigen Umgebungen. Wenn wir die RTK-Daten von einer stationären 19-km-Basislinie mit dem Rover in einer Vorstadtumgebung betrachten (5 m von einem zweistöckigen Gebäude mit Bäumen in der Nähe entfernt), so ist eine Verbesserung sowohl bei der Größe der Positionsfehler als auch bei der Schätzung der Positionsfehler festzustellen. In jedem Diagramm gibt die obere Achse den Positionsfehler in der Horizontalen und die untere Achse den vertikalen Positionsfehler an.

Die blauen Kurven zeigen den Positionsfehler gegenüber der bekannten Koordinate des Messpunkts an. ProPoint liefert eine genauere und präzisere Lösung als das RTK-System der Vorgängergeneration.

Die roten und orangefarbenen Kurven geben die 1-Sigma-, 2-Sigma- und 3-Sigma- Fehlerschätzungen an, die vom Empfänger in Echtzeit ausgegeben werden. Diese haben sich mit ProPoint enorm verbessert, denn der tatsächliche Positionsfehler wird unter diesen widrigen Bedingungen besser geschätzt. Auch die Fehlerabschätzungen sind weniger unregelmäßig. Auf diese Weise können Anwender in Echtzeit besser einschätzen, ob die Positionslösung ihre Genauigkeitsanforderungen erfüllt.

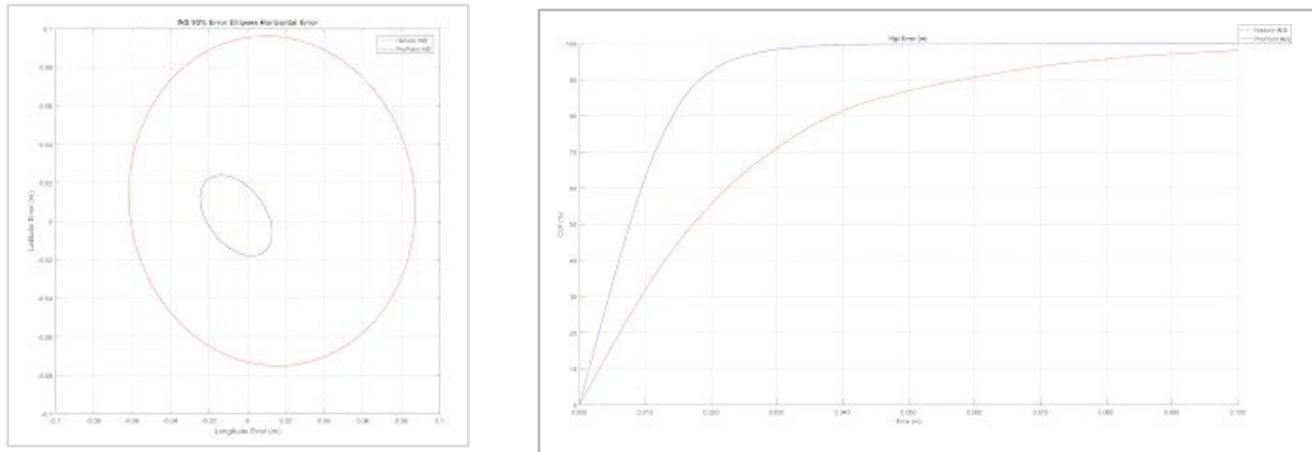


Positionsdaten mit dem Trimble ProPoint-Modul    Positionsdaten mit RTK der Vorgängergeneration

## GNSS/INS-Effizienz

Die folgenden Ergebnisse stammen aus einer Analyse einer 13-km-Fahrt in städtischen Außenbezirken. Das System wurde hierbei im Modus GNSS/INS (RTK) verwendet.

Die Reichweite erstreckte sich von der Referenzstation bis zu etwa 9 km von der Referenzstation. Eine deutliche Verbesserung zeigt sich in den 95%-Fehlerellipsen der horizontalen Positionsdaten, die für ProPoint blau dargestellt sind. Dies ist die Differenz zwischen den GNSS/INS- Echtzeitpositionen und einer hochpräzisen, nachbearbeiteten wahren Trajektorie unter Verwendung eines Applanix® POS LV®-Systems (eines hochwertigen IMU-Systems).



Ähnliche Verbesserungen sind bei der vertikalen Positionsdaten zu beobachten. Ein Blick auf die kumulative Verteilungsfunktion zeigt deutliche Verbesserungen bei der Darstellung des Fehlers in der Höhenkomponente. Mit dem GNSS/INS-System der Vorgängergeneration lagen 95 % der Höhenwerte (das 95-Perzentil) innerhalb von 78 mm der wahren Trajektorie. Beim ProPoint-System liegen nun **95 % der Höhenwerte innerhalb von 23 mm der wahren Trajektorie**.

## Schlussfolgerung

Das Trimble ProPoint-Verfahren ist eine Investition in die Zukunft. Es kann aktuelle und zukünftige GNSS-Messungen mit Inertial- und Sensordaten fusionieren, um in den ungünstigsten Umgebungen erstklassige Leistung zu erzielen. Wenn Genauigkeit, Verfügbarkeit und Integrität entscheidende Anforderungen für Ihren Anwendungsbereich sind, dann ist ProPoint die ideale Wahl.

Trimble Inc. 10368 Westmoor Drive, Westminster CO 80021, USA  
[geospatial.trimble.com](http://geospatial.trimble.com)

© 2024, Trimble Inc. Alle Rechte vorbehalten. Trimble, das Globus- & Dreieck-Logo, Applanix, POS LV, ProPoint, Trimble RTX und xFill sind Marken von Trimble Inc. oder seinen Tochtergesellschaften, eingetragen in den Vereinigten Staaten und in anderen Ländern. Maxwell ist eine Marke von Trimble Inc. Galileo wird unter Lizenz der Europäischen Union und der Europäischen Weltraumorganisation entwickelt. Alle anderen Marken sind Eigentum der entsprechenden Inhaber. PN 022482-4493 de-DE (01/24)