



# Neuheiten in der GPS-Antennentechnologie: Die neuen Trimble Zephyr-Antennen

**Eric Krantz und Dr. Stuart Riley, Trimble GPS Engineering and Construction Group, Sunnyvale, California, USA. Peter Large, Trimble Integrated Surveying Group, Westminster, Colorado, USA.**

## Neue Antennentechnologie von Trimble

Die Trimble Zephyr™- und Zephyr Geodetic™-Antennen sind zwei neue hochpräzise Zweifrequenz-GPS-Antennen für höchste Ansprüche. Sie bieten die Leistung einer Choke Ring-Antenne und sind gleichzeitig kleiner, leichter und wesentlich preisgünstiger. Beide Antennen sind das Ergebnis intensiver Forschung und Entwicklung unter Einsatz der neuesten Entwicklungen in der GPS-Technologie für Hochleistungsantennen, für die Trimble Patente erhielt. Die neuen Antennen bieten als wesentliche Neuerungen:

- Frequenzunabhängiges Antennendesign
- Fortschrittliche Werkstofftechnologie
- Hochpräzise Fertigungstechnologie
- Trimble Stealth™-Grundplattentechnologie

Das Resultat ist eine Stabilität des Antennenphasenzentrums (APC) und Mehrwegeunterdrückung, die mit der Leistung einer Choke Ring-Antenne vergleichbar ist, sowie eine verbesserte Verfolgung tief stehender Satelliten unter extremen Bedingungen.

Durch den Einsatz fortschrittlicher Werkstoffe sind die Zephyr- und Zephyr Geodetic-Antennen extrem kompakt und leicht. Obwohl die heute verwendeten Antennenelemente und die rauscharmen Verstärker modifiziert werden müssen, um mit der zukünftigen zweiten L5-Zivildfrequenz kompatibel zu sein, ist das Design der neuen Trimble Stealth-Grundplatte frequenzunabhängig.

## Patentiertes Antennenelement-Design für sub-Millimeter Stabilität

Das GPS-Antennenelement ist der Teil einer Antenne, der auf die von GPS übertragene Energie reagiert. Für genaue GPS-Vermessungen ist dieses Element in der Regel ein flaches Stück Metall, das als Messelement („Patch“) bezeichnet wird. Es ist normalerweise rund oder fast quadratisch. Aufgrund der Abmessungen reagiert dieses Messelement auf die vom Empfänger verfolgten GPS-Frequenzen. Wenn eine GPS- Empfänger/Antennenkombination Satelliten verfolgt, und Code- und Trägerphasenmessungen aufzeichnet, sind die tatsächlichen Punkte im Raum, zwischen denen diese Messungen durchgeführt werden, die unmittelbaren Phasenzentren des GPS-Satelliten und der GPS-Empfängerantenne.

Das Antennenphasenzentrum der GPS-Empfängerantenne befindet sich theoretisch im Mittelpunkt des quadratischen Messelements, dem mechanischen Zentrum der Antenne. In der Praxis ist das effektive elektrische Zentrum der Antenne jedoch kein konstanter Punkt, sondern unterliegt kleinen Variationen.

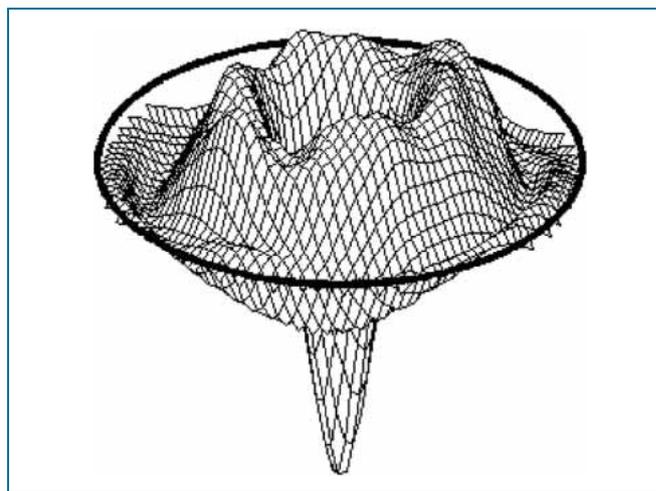
Die Variation ist eine Funktion des aktuellen Azimuts und der Höhe des verfolgten Satelliten und auch abhängig davon, wie die Einspeisung in die Antenne erfolgt, also davon, wie die Antenne elektrisch mit dem Rest des Schaltkreises verbunden ist. Da immer mehrere Satelliten mit unterschiedlichem Azimut und unterschiedlicher Höhe zur gleichen Zeit verfolgt werden, wird jede Messung von einer etwas anderen Position im Raum durchgeführt, an einem Punkt in der Nähe des mechanischen Zentrums der Antenne. Obwohl Beobachtungen an einem einzigen Punkt im Raum für Vermessungen erforderlich sind, empfängt die Antenne Messungen von einer gan-

zen Reihe von Antennenphasenzentren, deren Positionen sich alle geringfügig unterscheiden.

Die Variation zwischen diesen elektrischen Antennenphasenzentren ist in etwa vergleichbar mit einem Fehlerellipsoid. Bei einer großen Antennenvariation ist das entsprechende Ellipsoid ebenfalls groß. Eine ideale GPS-Antenne würde alle Messungen von einer exakt definierten, mechanischen Position empfangen, unabhängig von der Höhenmaske und dem Azimut des Satelliten oder anderen Faktoren. Eine solche Antenne hätte eine hervorragende Phasenzentrumsstabilität.

In der Praxis variieren alle elektrischen Antennenphasenzentren von GPS-Antennen – selbst die Phasenzentren von Choke Ring-Antennen, die für die präzisesten geodätischen und wissenschaftlichen Vermessungen eingesetzt werden. Es gibt jedoch zwei wichtige Unterschiede zwischen einer äußerst präzisen Hochleistungsantenne (z. B. einer Choke Ring-Antenne) und einer weniger genauen Antenne mit geringerer Leistung.

Zum Einen liegen bei Hochleistungsantennen die Variationen des Phasenzentrums unter 1 mm, unabhängig von der Ausrichtung der Antenne und davon, aus welcher Richtung das Signal empfangen wird. Bei konventionellen, weniger leistungsstarken Antennen ist die Charakteristik der Antenne auf der asymmetrischen horizontalen Antennenoberfläche nicht einheitlich, das Antennenphasenzentrum ist daher wesentlich instabiler. Bei einer Antenne mit geringerer Leistung treten horizontale Phasenzentrumsverschiebungen auf, die in Abhängigkeit von der Richtung des Satelliten und der Ausrichtung der Antenne variieren. Darüber hinaus ist es möglich, dass zwei Antennen desselben Typs geringfügig unterschiedliche Fertigungstoleranzen aufweisen. Werden diese Antennen an beiden Endpunkten einer Basislinie aufgestellt und sind nicht in



*Abb. 1: Typisches Muster einer Phasenzentrumsvariation als Funktion von Azimut und Höhe der Satelliten. Auch wenn das Phasenzentrum jeder Antenne eine gewisse Variation aufweist, ist diese Variation bei Hochleistungsantennen minimal, vorhersehbar und für alle Antennen eines Typs gleich, daher können die Variationen bei der Berechnung entfernt oder modelliert werden*

die gleiche Richtung ausgerichtet, entstehen nicht reproduzierbare relative horizontale Phasenzentrumsvariationen. Dieses unvorhersehbare Verhalten wird auch durch Auswertung von Doppeldifferenzen nicht aufgehoben. Da diese Variationen zufällig sind, können sie nicht modelliert werden, was zu zusätzlichen Fehlern in der Basislinienlösung führt.

Zum Zweiten treten bei allen Antennen (auch bei Choke Ring-Antennen) beträchtliche absolute vertikale Phasenzentrumsvariationen in Abhängigkeit von der Höhenmaske des Satelliten auf. Diese Variationen sind jedoch bei Hochleistungsantennen äußerst einheitlich, auch bei verschiedenen Antennen desselben Typs. Das bedeutet, dass die Phasenzentrumsvariationen von zwei Antennen, die an jedem Ende einer Basislinie aufgestellt werden, fast identisch sind. Dieser hochkorrelierte Fehler wird durch Auswertung von Doppeldifferenzen aufgehoben, und der durch das unmittelbare Offset erzeugte Fehler wird entfernt.

Ist die Basislinie länger als 50 km, ergeben sich für die Antennen an jedem Ende der Basislinie graduelle Unterschiede hinsichtlich der Satellitenhöhe und des Azimuts, d.h. der Höhenwinkel korreliert mit der Entfernung. Dieser Effekt ist für die Antennenphasenzentren von Hochleistungsantennen mit einer einfachen Korrekturabelle genau vorhersagbar und wird bei der Auswertung berücksichtigt. Es gibt zwar ebenfalls Korrekturtabellen für konventionelle Antennen, da aber die Variationen bei Antennen desselben Typs uneinheitlich sind, können sie nicht präzise vorhergesagt werden, was zu Fehlern in der Lösung führt.

Wenn sich das Antennenphasenzentrum als Funktion der Satellitenhöhe, unabhängig vom Azimut des Satelliten, genau vorhersagbar und einheitlich verhält und für eine große Anzahl von Antennen desselben Typs innerhalb sehr geringer Toleranzen liegt, hat die Antenne eine hervorragende Phasenzentrumsstabilität.

Für Zweifrequenz-Vermessungen muss die Antenne sowohl L1- als auch L2-Satellitenträgerphasen verfolgen können. Um einen optimalen Empfang zu gewährleisten, muss das Messelement für jede Frequenz andere Abmessungen aufweisen.

Ein L1-Messelement, das über dem L2-Messelement angebracht wird, bietet eine Lösung. Jedes Messelement ist durch eine Zuleitung mit dem rauscharmen Verstärker der Antenne verbunden. GPS-Signale werden vom Satelliten mit einer rechtsdrehenden zirkularen Polarisation (Right-Hand Circular Polarisation, RHCP) gesendet, und die Empfänger-Antenne muss für eine optimale Empfängerleistung dieselbe Polarisation aufweisen. RHCP wird in konventionellen Antennen mit einer Zuleitung dadurch erreicht, dass eine Phasenverschiebung um 90 Grad in zwei Resonanzmodi auf dem Messelement erzeugt wird. Bei Antennen mit quadratischem Messelement verfügt das Messelement über zwei parallele Resonanzseiten direkt unterhalb der Mittelfrequenz (z. B. L1). Die beiden anderen parallelen Resonanzseiten liegen etwas oberhalb der Mittelfrequenz.

Obwohl diese Lösung funktioniert, ist sie für hochgenaue Vermessungsanwendungen doch mit beträchtlichen Einschränkungen verbunden: Eine konventionelle GPS-Antenne hat eine geringere Phasenzentrumsgenauigkeit, und die Satellitenverfolgung wird beeinträchtigt. In der Praxis funktioniert diese Lösung nur bei der Mittelfrequenz. Aufgrund des asymmetrischen Messelements ist keine kreisförmige Polarisierung für die effektive Verfolgung der rechts-

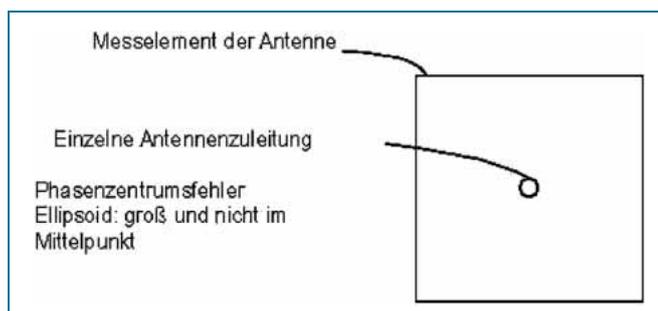


Abb. 2: Konventionelles GPS-Antennendesign

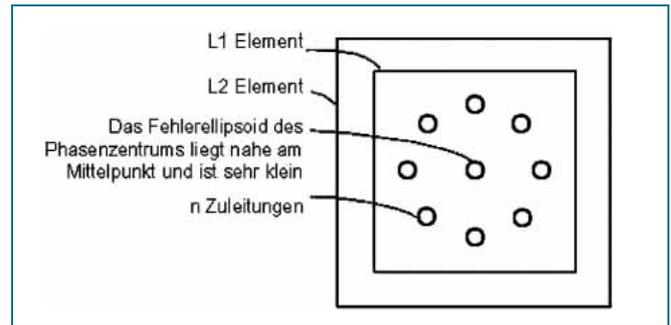


Abb. 3: Trimble Zephyr-Antenne mit symmetrischen n-Punkt-Zuleitungen

drehenden zirkularen Polarisation der GPS-Signale gegeben. Dieser Polarisationsverlust führt zu einem reduzierten Signal-Rausch-Verhältnis (SNR); die empfangenen Signale sind schwächer und weisen ein größeres Rauschen auf. Die Antenne wird dadurch ebenfalls anfälliger für Mehrwegeausbreitung, da die Reflexion des Signals (z. B. vom Boden) oft eine Polarisationsänderung zur linksdrehenden zirkularen Polarisation (LHCP) zur Folge hat. Eine Antenne, die besser auf RHCP abgestimmt ist, weist eine linksdrehende zirkuläre Polarisation mit größerer Wahrscheinlichkeit zurück und ist daher auch weniger anfällig für Mehrwegeausbreitung.

Konventionelle Antennen haben normalerweise nur eine Antennenzuleitung, über die die Antenne an einem einzigen Punkt mit dem restlichen Schaltkreis verbunden ist, allerdings wird die Antenne dadurch asymmetrisch – das Ergebnis sind uneinheitliche Phasenzentrumsvariationen.

Im Gegensatz zu konventionellen Antennen verfügen die Trimble Zephyr- und Zephyr Geodetic-Antennen über eine innovative n-Punkt-Antennenzuleitung mit „n“ Zuleitungen, die auf einem symmetrischen Antennennesselement angeordnet sind (wobei n eine positive ganze Zahl größer als zwei ist). Der wesentliche Vorteil dieses Designs liegt in der fast perfekten Symmetrie, die durch die Kombination eines Phasensystems mit mehreren, genau positionierten Antennenzuleitungen und hochpräziser Fertigungstechnologie erreicht wird.

Das Ergebnis: sub-Millimeter Phasenzentrumsstabilität, die der Genauigkeit einer Choke Ring-Antenne entspricht. Darüber hinaus verbessert die einzigartige Symmetrie dieser Antenne das RHCP beträchtlich und ermöglicht die Verfolgung eines wesentlich größeren Frequenzbereichs. Die Antenne bzw. der Empfänger kann somit die GPS-Signale unter schwierigen Bedingungen mit einem erhöhten SNR besser verfolgen, und die Antenne ist weniger anfällig für Mehrwegeausbreitung.

## Die Zephyr-Antenne im Rotationstest

Zur Überprüfung der L1- und L2-Phasenzentrumsstabilität und der Antennensymmetrie einer Trimble Zephyr-Antenne wurde die Antenne auf einer Vorrichtung angebracht, mit der die Antenne alle 8 Stunden um 90 Grad gedreht wurde. Die Daten dieser achtstündigen Sitzung wurden dann einzeln gemäß dem Modell der doppelten Differenzen für kurze Basislinien verarbeitet. Eine Choke Ring-Antenne, die einige Meter entfernt positioniert wurde, diente als Referenz.

Nach Abschluss des Tests war für jede GPS-Frequenz ein Satz von 5 Ergebnissen (0, 90, 180, 270 und 360) mit geringfügig verschiedenen Positionen aufgrund der uneinheitlichen Phasenzentrumspositionen verfügbar. Die Antenne zeigte bei der Testauswertung eine besonders gute horizontale Phasenzentrumsstabilität (siehe Abb. 4 auf der nächsten Seite) – eine Phasenzentrumsvariation von deutlich unter 1 mm für die L1- und die L2-Frequenz.

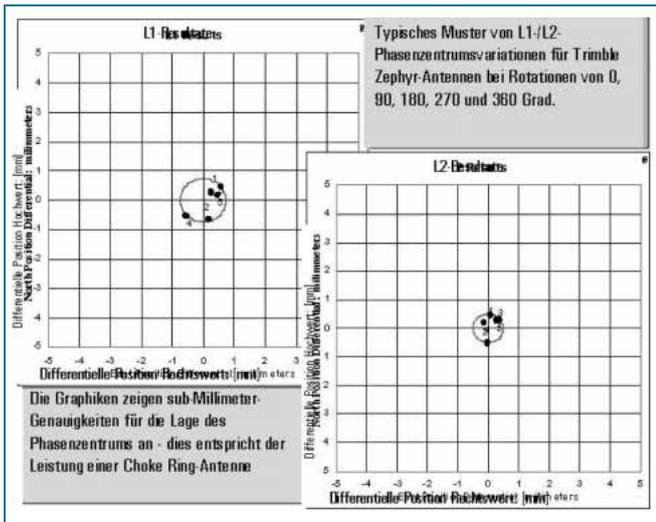


Abb. 4: Horizontale Phasezentersstabilität für L1- und L2-Frequenzen

### Leistung der Zephyr-Antenne bei der Verfolgung hoch stehender Satelliten

Während der Tests wurde ebenfalls gemessen, wie gut die hochsymmetrischen Trimble Zephyr- und Zephyr Geodetic-Antennen tief und hoch stehende Satelliten verfolgen können.

Eine einfache Methode zur Messung und zum Vergleich der Verfolgungsleistung von GPS-Empfängern ist der Vergleich von Daten, die über einen Zeitraum von mindestens 24 Stunden aufgezeichnet wurden. Verglichen werden dabei die Gesamtzahl aller möglichen Beobachtungen und die in der Datei enthaltene Anzahl der tatsächlich durchgeführten Beobachtungen. Aus diesen Werten kann das Verhältnis der möglichen und der während dieses Zeitraums tatsächlich durchgeführten Beobachtungen berechnet werden.

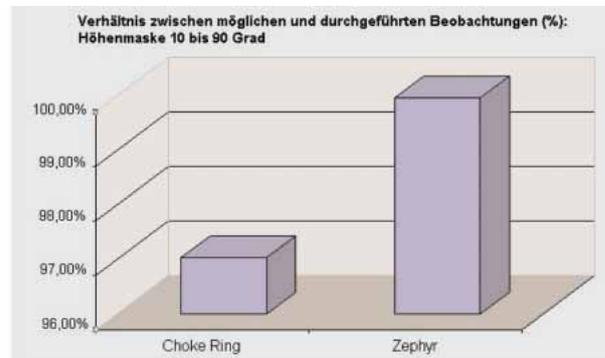
Bei einer perfekten GPS-Empfänger/Antennenkombination würde das Verhältnis zwischen möglichen/tatsächlichen Beobachtungen immer 100 % betragen. In der Praxis kann jedoch Folgendes auftreten: Phasensprünge, Hindernisse in geringer Höhe und Unterbrechungen des Satellitensignals. Wenn dies geschieht, werden keine Daten in der Datei aufgezeichnet, das Verhältnis ist daher nicht ganz so perfekt. Ein Prozentsatz von ungefähr 100 % weist auf eine insgesamt bessere Satellitenerfassung und -verfolgung hin.

Bei tief stehenden Satelliten durchqueren die GPS-Signale die Erdatmosphäre in einem sehr flachen Winkel. Die Signalstärke wird durch Refraktion beträchtlich verringert und das Rauschen somit erhöht. Schwache Signale sind wesentlich schwieriger zu verfolgen. Bei einer Höhenmaske von unter 10 Grad (und vor allem unter 5 Grad) nehmen die Datenlücken in der Datei sehr stark zu. Die Verfolgungsstatistiken für hohe (Höhenmaske 10 bis 90 Grad) und tief stehende Satelliten werden daher normalerweise als separate Datensätze bewertet.

Um einen Anhaltspunkt für Höhenmarken zwischen der neuen Trimble Zephyr-Antenne und der bewährten Choke Ring-Antenne zu erhalten, wurden Daten mit beiden Antennen am selben Standpunkt mit demselben Trimble GPS-Empfänger an unterschiedlichen Tagen aufgezeichnet. Da die Leistung unter typischen GPS-Vermessungsbedingungen im Feld bewertet werden sollte, wurden die Daten in einem Gebiet mit Hindernissen in der näheren Umgebung (z. B. Bäume) erfasst. An beiden Tagen wurden ebenfalls Daten mit einer 3 m entfernt positionierten Choke Ring-Antenne aufgezeichnet, um sicherzustellen, dass sich die Bedingungen nicht geändert hatten. Die Resultate der Kontrollantenne stimmten an beiden Tagen überein – es gab keine signifikanten Unterschiede.

Das folgende Diagramm enthält einen Vergleich der erwarteten zu den tatsächlich beobachteten Epochen für die Zephyr- und die Choke Ring-Antennen bei einer Höhenmaske von 10 bis 90

Grad. Die Daten enthielten über eine halbe Million Messungen, die über einen Zeitraum von 24 Stunden bei 1 Hz aufgezeichnet wurden. Ausgewertet wurden 86 400 erwartete Epochen, multipliziert mit der durchschnittlichen Anzahl der Satelliten (~ 605 000 mögliche Epochen).



10 bis 90 Grad	Choke Ring	Zephyr
Verhältnis zwischen durchgeführten und möglichen Beobachtungen (in %)	97,02 %	99,96%

Die Ergebnisse zeigen, dass die Trimble Zephyr-Antenne wesentlich bessere Resultate erzielt (99,96 %), als die Choke Ring-Antenne (97,02 %), wenn beide Antennen mit demselben Empfänger kombiniert werden. Im Durchschnitt enthielten die Daten der Choke Ring-Antenne 75 Epochen weniger als die Daten der Zephyr-Antenne.

### Leistung der Zephyr-Antenne bei der Verfolgung tief stehender Satelliten

Beim obigen Test wurden im selben Zeitraum ebenfalls Daten von Satelliten mit Höhenmasken von 0 bis 10 Grad erhalten. Diese Daten wurden analysiert, um Aufschluss darüber zu gewinnen, wie gut die Trimble Zephyr-Antenne Signale tief stehender Satelliten verfolgen kann, bei denen Phasensprünge und Signalverluste wesentlich häufiger auftreten. Das Verhältnis zwischen den beobachteten und den möglichen Epochen für die Zephyr- und Choke Ring-Antenne ist im nachstehenden Diagramm für Höhenmasken von 0 bis 10 Grad angegeben:



Höhenmaske 0 bis 10 Grad	Choke Ring	Zephyr
Verhältnis zwischen durchgeführten und möglichen Beobachtungen (in %)	57,17%	60,47%



Auch hier belegen die Daten, dass eine Kombination aus einer Trimble Zephyr-Antenne und einem Trimble GPS-Empfänger bei der Verfolgung tief stehender Satelliten wesentlich besser abschneidet als eine Choke Ring-Antenne mit demselben Empfänger.

## Revolutionäre Trimble Stealth-Grundplatte

Obwohl GPS-Empfänger darauf ausgelegt sind, Sichtliniensignale von beliebigen Satelliten zu empfangen, kommt das Signal häufig über Umwege an der GPS-Antenne an. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Funksignale von einigen Oberflächen reflektiert werden. Funksignale können z. B. von Wasser, Gebäuden und Fahrzeugen reflektiert werden. Diese Mehrwegeausbreitung verzerrt die Korrelationsspitzen aus denen die Pseudo-Entfernungen abgeleitet werden und kann erhebliche Fehler in den L1- und L2-Pseudoentfernungsmessungen hervorrufen. Darüber hinaus werden durch Mehrwegeausbreitung Fehler in die L1-/L2-Trägerphasenmessungen eingeführt.

Die Grundplatte einer GPS-Antenne kann helfen, Mehrwegeeffekte zu reduzieren, die von Objekten unterhalb der Antenne stammen. An Land können die Signale z. B. auf Bodenhöhe oder von Dächern reflektiert werden, auf See dagegen von Wasser, den Stahlteilen eines Schiffes oder einer Hochseeplattform. Obwohl Mehrwegesignale, die durch Reflexion von Objekten oberhalb der Antenne (z. B. von Gebäudefassaden) entstehen, nicht durch eine Grundplatte reduziert werden können, sind diese Signale grundsätzlich schwächer als Signale, die auf Bodenhöhe reflektiert werden. Die Signale in Bodennähe sind stärker, da die Reflexion normalerweise in unmittelbarer Nähe der Antenne erfolgt.

GPS-Antennen verfügen im Allgemeinen über zwei verschiedene Arten von Grundplatten: die konventionelle flache Metallgrundplatte oder den Choke Ring.

Eine flache Grundplatte aus Metall ist sicherlich effektiver als eine Antenne ohne Grundplatte, sie hat allerdings einen Nachteil: Sie ist ein hervorragender Stromleiter mit geringem elektrischem Widerstand. Wenn vom Boden reflektierte Mehrwegesignale in einem bestimmten Winkel auf die Unterseite der Grundplatte treffen, kann die Mehrwegeausbreitung aufgrund der elektrischen Eigenschaften der Grundplatte durch Diffraktion oder Reflexion zur Antenne gelangen. Der Ring einer Choke Ring-Antenne besteht aus konzentrischen Vertiefungen in einer sehr dicken Grundplatte (eine Vertiefung entspricht in der Regel etwa 1/4 der Wellenlänge des Signals, auf das die Antenne abgestimmt ist). Signale, die von Objekten in Bodennähe reflektiert werden, „verfangen“ sich praktisch in diesen Vertiefungen. Das Choke Ring-Design ist bei Einfrequenz-Empfängern besonders effektiv, weist allerdings bei Zweifrequenz-GPS zwei grundlegende Schwächen auf:

1. Die erforderliche Tiefe des Choke Rings hängt von der Antennenfrequenz ab. Daraus ergeben sich für Einfrequenz-Empfänger keine Probleme. Bei Zweifrequenz-Empfängern arbeitet die Antenne entweder nur auf einer Frequenz effektiv oder aber der Empfang beider Frequenzen ist beeinträchtigt. Versuche mit Zweifrequenz-Variationen und einer bestimmten Choke Ring-Tiefe wurden durchgeführt, die erwartete bessere Zweifrequenz-Leistung wurde jedoch nicht durch unabhängige Testresultate belegt. Mit der Einführung der geplanten zweiten zivilen L5-GPS-Frequenz wird dieses frequenzabhängige Problem noch verstärkt, da diese frequenzabhängigen Antennen aufgrund des größeren Abstands der drei Messfrequenzen weniger effektiv sind.

2. Signale tief stehender Satelliten in direkter Sichtlinie zum Empfänger werden zusammen mit der Mehrwegeausbreitung abgeschwächt, wie in der vorstehenden Verfolgungsgraphik dargestellt. Zephyr Geodetic-Antennen sind mit der Trimble Stealth-Grundplatte ausgestattet, ein revolutionäres Design, das sowohl die Leistung der konventionellen flachen Grundplatten als auch des Choke Rings verbessert. Da diese Grundplatte frequenzunabhängig ist, kann sie auch in Hochleistungsantennen genutzt werden, die die GPS-Frequenzen L1, L2 und zukünftig auch L5 verfolgen. Trimble erhielt das U.S.-Patent Nr. 5694136 für dieses revolutionäre Design.

Hauptmerkmal der Grundplatte ist die Verwendung eines elektrischen Widerstands zur Abschwächung von Mehrwegesignalen. Ein komplexes Muster kleiner konzentrische Ringe führt zu einer exponentiellen Erhöhung des elektrischen Widerstands mit zunehmender Entfernung vom Antennenzentrum. Der Widerstand von der inneren zur äußeren Kante der Grundplatte wird dadurch extrem verstärkt. Obwohl diese Grundplatte relativ klein ist, wird sozusagen eine Grundplatte mit unendlichen Ausmaßen „simuliert“. Die fortschrittliche Werkstofftechnologie, die die Grundplatte ihren Namen verdankt, wurde ursprünglich als leichter, radarabschirmender Überzug für Stealth-Flugzeuge entwickelt, daher der Name „Trimble Stealth“-Grundplatte.

Wenn Mehrwegesignale, die zur Unter- oder Oberseite der Trimble Stealth-Grundplatte reflektiert werden, auf den hohen elektrischen Widerstand treffen, neutralisiert der Widerstand das elektrische Feld der elektromagnetischen Welle, und gibt die Energie als Wärme ab. Mehrwegeausbreitung wird effizient „weggebrannt“, damit kein starkes Mehrwegesignal zum Antennenelement gelangt. Dies steht im krassen Gegensatz zur flachen Metallgrundplatte, die lediglich über einen geringen Widerstand verfügt, Mehrwegeausbreitung kann daher bei dieser Antenne durch Diffraktion oder Reflexion zum Antennenelement gelangen.

Das Design dieser neuen Grundplatte bietet entscheidende Vorteile gegenüber konventionellen und Choke Ring-Grundplatten:

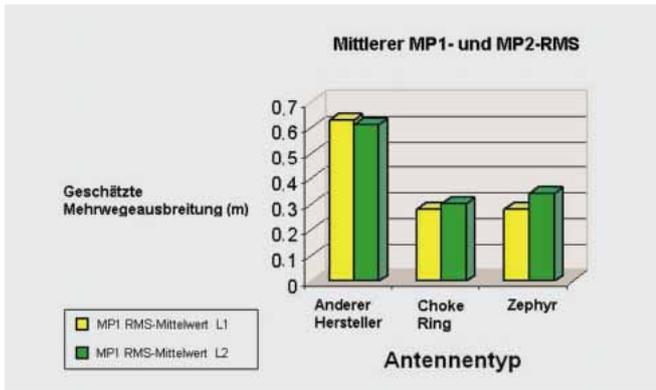
- Sie ist frequenzunabhängig auf der L1-, L2- und der zukünftigen L5-Frequenz. Die Abmessungen müssen nicht auf eine bestimmte Frequenz abgestimmt sein, sie arbeitet auf allen drei Frequenzen gleichermaßen effektiv (Bitte beachten Sie, dass die heute lieferbaren Antennen nicht L5-kompatibel sind, da dafür Änderungen am Antennenelement und am rauscharmen Verstärker erforderlich sind).
- Die Verfolgung tief stehender Satelliten ist nicht beeinträchtigt (im Gegensatz zur Choke Ring-Antenne).
- Die verwendete Methode und das Material ermöglichen eine kompaktere, leichte, tragbare und preisgünstigere Antenne, die für hochgenaue Vermessungen eingesetzt werden kann, für die bislang Choke Ring-Antennen erforderlich waren.
- Sie ist besonders effektiv bei hochgenauen Anwendungen zu Land und auf See, wo durch Reflexion von Wasser und/oder Metall unterhalb der Antenne starke Mehrwegeausbreitungen an der Unterseite der Grundplatte auftreten.

## Die Trimble Zephyr-Antenne im Mehrwegeausbreitungstest

Zur Bewertung des kombinierten Mehrwegewiderstands der Zephyr-Antenne und des Trimble 5700-GPS-Empfängers wurden eine Zephyr/5700-Kombination und eine Trimble Choke Ring/5700-Empfängerkombination getestet und miteinander verglichen. Ein Zweifrequenz-GPS-Empfänger mit Vermessungsqualität und eine Antenne eines anderen Herstellers wurden als Vergleichsmodell ebenfalls getestet.

Zur Bewertung der Mehrwegeausbreitung wurden die geschätzten MP1- und MP2-Mehrwegewerte<sup>1</sup> in den L1- und L2-Daten genutzt. Der Test wurde über einen Zeitraum von 24 Stunden durchgeführt, wobei Beobachtungen mit einer Rate von 1 Hz aufgezeichnet wurden. Die MP1- und MP2-Werte wurden für jeden Satelliten und jede Epoche berechnet, so dass über 500 000 Beispieldaten für jede Antenne Verfügung standen.

Der MP1 RMS-Mittelwert ist das Mittel der für jeden Satelliten berechneten RMS MP1-Werte, die wiederum als RMS aller MP1-Werte eines bestimmten Satelliten über den Gesamtzeitraum von 24 Stunden berechnet wurden. Der MP2 RMS-Mittelwert wird auf dieselbe Art und Weise aus allen MP2-Schätzungen berechnet. Die geschätzten MP1- und MP2-Werte geben das durchschnittliche Niveau der Mehrwegeausbreitung im gesamten Datensatz an und sind für alle drei GPS-Empfänger/Antennenkombinationen in nachstehendem Diagramm dargestellt.



Die MP1- und MP2-Werte der Choke Ring und Zephyr-Antenne sind bis auf 1/7500 eines einzelnen C/A-Code-Chips identisch und belegen den hervorragenden „Choke Ring“-Pseudoentfernungsmehrwegewiderstand der Zephyr-Antenne.

In diesem großen Datensatz mit über einer halben Million Messungen schnitt die konventionelle Antenne eines anderen Herstellers nicht so gut ab: Die Daten enthielten ungefähr doppelt so viel L1- und L2-Mehrwegeausbreitungen wie die Daten der Choke Ring- und Zephyr-Antennen.

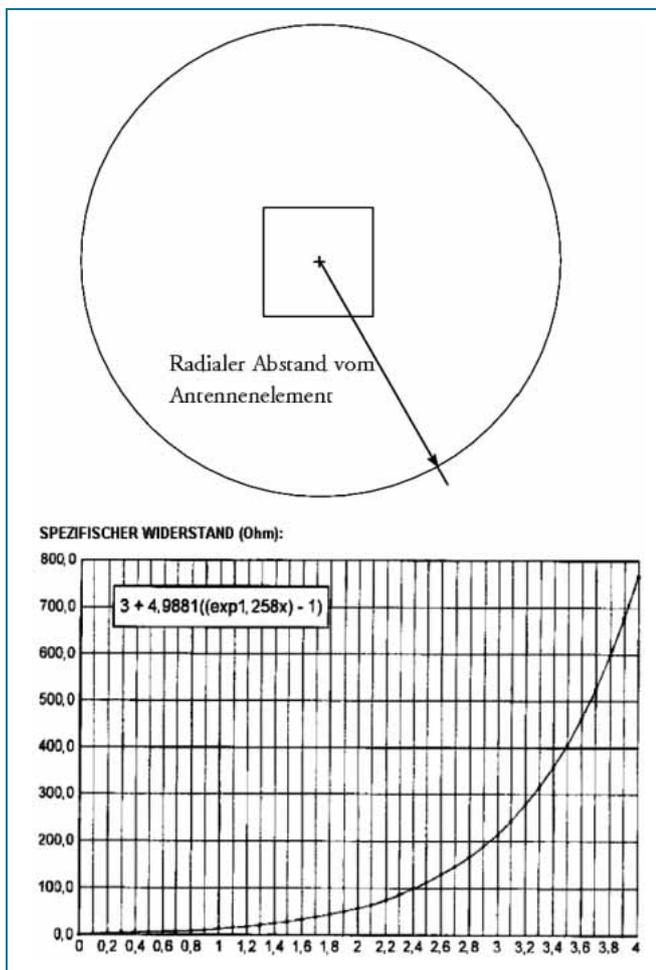


Abb. 5: Die Zephyr-Antenne ist mit der revolutionären Trimble Stealth-Grundplatte ausgestattet. Die Grundplatte besteht aus einem fortschrittlichen Werkstoff, der den Schichtwiderstand entlang eines beliebigen Radialabstands ausgehend vom Antennenelement exponentiell erhöht. Dieser elektrische Feldwiderstand wandelt Mehrwegesignale in Wärme um – ähnlich der Methode, die bei Stealth-Flugzeugen zur Radarabschirmung eingesetzt wird

Dies verdeutlicht, dass eine fortschrittliche preisgünstigere und leichtere GPS-Antenne, die tief stehende Satelliten besser verfolgen kann, in Verbindung mit einem fortschrittlichen GPS-Empfänger vergleichbare Resultate erbringt wie eine präzise gefertigte Choke Ring-Antenne.

## Trägerphasen-Mehrwegeresistenz im Vergleich zur Choke Ring-Antenne

Um festzustellen, wie gut die Trimble Stealth-Grundplatte Trägerphasen-Mehrwegefehler reduziert, wurde ein Test vorbereitet, der einen Vergleich der Resultate zwischen einer Choke Ring-Kontrollantenne mit drei anderen Testantennen erbringen sollte. Folgende Testantennen wurden verwendet: eine weitere Choke Ring-Antenne, eine Trimble Zephyr-Antenne und eine konventionelle GPS-Antenne mit Vermessungsqualität eines anderen Herstellers.

Drei Datensätze mit statischen Daten wurden unter Verwendung derselben Messpeiler in einem Abstand von ca. 3 m erfasst. Die Choke Ring-Kontrollantenne wurde bei diesem Test am „Basisende“ und die Testantenne am anderen Ende aufgestellt.

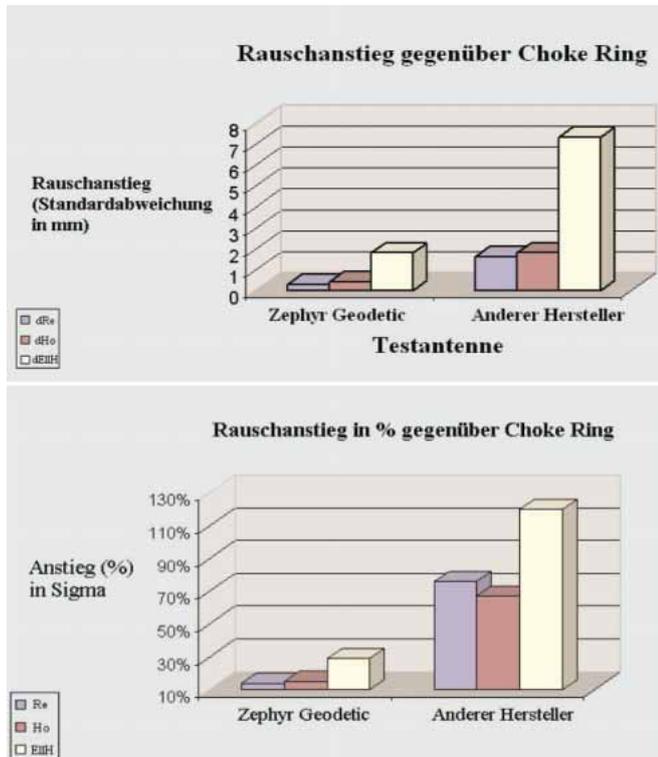
Über einen Zeitraum von 24 Stunden wurden für alle Basislinien Daten in Intervallen von 1 Sekunde aufgezeichnet und dann mit der PC-Version des Trimble RTK-Prozessors (normalerweise in Trimble GPS-Empfängern enthalten) verarbeitet.

Mehrwegeausbreitungen (vor allem vom Boden reflektierte Signale), die von einer Grundplatte reduziert werden, dekorrelieren in Abhängigkeit von der Basislinienlänge besonders schnell – die an beiden Enden der 3 m langen Basislinien durchgeführten Beobachtungen ergaben eine sehr geringe Korrelation. Es wurde nicht davon ausgegangen, dass das Mehrwegerauschen bei der Auswertung von Doppeldifferenzen von Epoche zu Epoche aufgehoben würde. (Die Dekorrelation ist eine Folge der kurzen Wellenlänge der L1- und L2-Trägerphasen von 19 cm bzw. 24 cm). Die Periodizität von Mehrwegesignalen beträgt in der Regel 1 Minute. Da die Beispieldaten über 24 Stunden aufgezeichnet wurden, sollte sich laut Statistik die gesamte Mehrwegeausbreitung für die in diesem Zeitraum erfassten Daten der Basislinienkomponenten erwartungsgemäß aufheben. Mit anderen Worten, das Mittel der Basislinienkomponenten wird aus allen Daten im Aufzeichnungszeitraum (in diesem Fall 24 Stunden) geschätzt. Dieser Mittelwert ist um ein Vielfaches größer als die typische Frequenz des Mehrwegefehlers. Mehrwegesignale können über einen solchen Zeitraum als zufällig betrachtet werden, daher sind die Ergebnisse relativ frei von Verzerrungen. Die gemittelten Basislinienkomponenten und die entsprechenden Standardabweichungen wurden aus den Datensätzen des Gesamtzeitraums berechnet, um eine Schätzung der Fehlerverteilung für jeden Antennentyp zu erhalten. Man ging dabei davon aus, dass, obwohl die Schätzungen aufgrund der Mittelwertbildung über den langen Zeitraum frei von Mehrwegeausbreitung sein sollten, die Standardabweichungen trotz allem die durchschnittlichen Mehrwegefehler in den Daten widerspiegeln würden. Die Schätzungen der Standardabweichung sind in der nachstehenden Tabelle für die drei getesteten Antennen in Millimetern angegeben:

	Re	Ho	EIIIH
Choke Ring	2,1	2,7	6,1
Zephyr Geodetic	2,4	3,1	7,9
Anderer Hersteller	3,7	4,5	13,4

Anstieg(%) gegenüber Choke Ring-Antenne	Re	Ho	EIIIH
Zephyr Geodetic	14 %	15 %	29 %
Anderer Hersteller	76 %	67 %	120 %

Die Ergebnisse zeigen, dass die Basislinie von Choke Ring- zu Choke Ring-Antenne ein Restrauschen von unter 3 mm horizontal und ca. 6 mm vertikal enthält. Die Ergebnisse der Zephyr-Antenne mit der Trimble Stealth-Grundplatte liegen mit einem Rauschen von ungefähr 3 mm horizontal und 1,8 mm vertikal nahe bei den Choke Ring-Ergebnissen. Die Antenne eines anderen Herstellers schnitt wesentlich schlechter ab: Das vertikale Restrauschen dieser Antenne war mehr als doppelt so hoch wie bei der Choke Ring-Antenne, was auf eine bedeutend größere Anfälligkeit für Mehrwegeausbreitung hinweist. Das folgende Diagramm verdeutlicht den Anstieg des Rauschens für beide Antennentypen. Dieser Anstieg wurde für die Choke Ring-Antenne durch Subtraktion der abgeleiteten Standardabweichung der Basislinienkomponenten von den abgeleiteten Standardabweichungen der getesteten Antenne berechnet.



## Schlussfolgerung

Mit der neuen Trimble Zephyr-Antenne haben neue bedeutende Technologien in die GPS-Vermessung Einzug gehalten. Nutzer profitieren von der verbesserten Genauigkeit, die durch die sub-Millimeter Phasenzentrumsstabilität, den verbesserten Mehrwegewiderstand und der besseren Verfolgung tief stehender Satelliten bei allen Höhenwinkeln unter schwierigen Bedingungen erreicht wird. Für Nutzer des geodätischen oder wissenschaftlichen GPS bietet die Zephyr Geodetic-Antennentechnologie in Verbindung mit dem 5700 WAAS/EGNOS-Empfänger sub-Millimeter Phasenzentrumsstabilität und einen Mehrwegewiderstand, der mit der Leistung einer

Choke Ring-Antenne vergleichbar ist. Weitere Vorteile sind die bessere Verfolgung niedriger Satelliten, die kompakte Ausführung, das Gewicht und der Preis. Trimble-Antennenelemente, die gegenwärtig geliefert werden, sind noch nicht mit der zukünftigen L5-Frequenz kompatibel. Da die Trimble Stealth-Grundplatte frequenzunabhängig ist, kann sie mit L1-/L2-Antennenelementen eingesetzt werden und ist sogar L5-kompatibel (wenn alle drei Frequenzen verfügbar sind, inkl. L5) – ein zukunftsorientiertes Design!

RTK-Nutzer profitieren beim Einsatz der Trimble Zephyr Geodetic-Antenne mit der Trimble Stealth-Grundplatte von der verbesserten Genauigkeit, vor allem, wenn diese im Vergleich zu Antennen ohne Grundplatte, an Basisstationen eingesetzt werden. Für Nutzer des Rover-RTK kann ein 5700 GPS-WAAS/Egnos-Empfänger mit einer Zephyr-Antenne aufgrund der vorstehend beschriebenen überlegenen Verfolgung hoch und tief stehender Satelliten bei RTK-Vermessungen die Verfolgung kontinuierlich aufrecht erhalten, wodurch die Anzahl verlorener Initialisierungen unter erschwerten Bedingungen beträchtlich reduziert wird. Darüber hinaus ist aufgrund der wesentlich geringeren Mehrwegeausbreitung, die mit der einer Choke Ring-Antenne vergleichbar ist, eine bessere Leistung bei RTK-Vermessungen gegeben. Die Genauigkeit wird verbessert, die Initialisierungszeiten verkürzt und die Zuverlässigkeit der RTK-Initialisierung erhöht. Die Positionsgenauigkeit wird durch sub-Millimeter Phasenzentrumsstabilität verbessert, und die Antenne ist für erhöhten Tragekomfort extrem kompakt und leicht.

## Zephyr-Antennen – Technische Daten

- Maße: 12,5 cm Durchmesser × 5,7 cm maximale Tiefe
- Gewicht: 0,45 kg
- Betriebstemperatur – 40 °C bis +70 °C
- 100 % wasserdicht, vollständig versiegelt
- Aufprallfestigkeit: Hält einem Fall von 2 m auf eine harte Oberfläche stand
- Vibrationstest gemäß MIL-810-F
- Antenne mit 4 Zuleitungen für sub-mm Stabilität des Antennenphasenzentrums
- Integrierter rauscharmer Verstärker
- 50 dB Antennengewinn

## Zephyr Geodetic-Referenzstationsantenne

- Maße: 34,3 cm Durchmesser × 7,6 cm maximale Tiefe
- Gewicht: 1,0 kg
- Betriebstemperatur – 40 °C bis +70 °C 100 % wasserdicht, voll versiegelt
- Aufprallfestigkeit: Hält einem Fall von 2 m auf eine harte Oberfläche stand
- Vibrationstest gemäß MIL-810-F
- Antenne mit 4 Zuleitungen für sub-mm Stabilität des Antennenphasenzentrums
- Integrierter rauscharmer Verstärker
- 50 dB Antennengewinn
- Trimble Stealth™-Grundplatte für geringe Mehrwegeausbreitung