



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology



Diplomarbeit

Validierung von Positionsbestimmungen bei Gleismessaufnahmen mit GNSS Mehrantennen-Systemen

ausgeführt am

Department für Geodäsie und Geoinformation, Forschungsbereich Höhere
Geodäsie

der Technischen Universität Wien

unter der Anleitung von

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Robert Weber

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Eingereicht von

BSc. Philip Prochazka

00925708

Kurzfassung

Um die absolute Lage und Geometrie eines Gleises rasch und ohne großen Aufwand bestimmen zu können hat die Fa. Plasser&Theurer ein System entwickelt, bei welchem ein 4-Antennen-GNSS-System zur Positionsbestimmung und 4 Profilsensoren zur Aufnahme der Schienen auf ein Triebfahrzeug installiert werden. Das 4-Antennen-GNSS-System bestimmt die Position und Ausrichtung des Triebfahrzeuges und somit die Lage des fahrzeugspezifischen Koordinatensystems (Bodyframe) im Raum. Im Bodyframe sind die Positionen der 4 Profilsensoren bekannt. Mit Hilfe der Abstandsmessung von den Profilsensoren zu den Schienen, ist die Position der Schienen in Bodyframe und weiter im Raum bekannt.

Ziel dieser Arbeit ist es, die aus mehreren Messfahrten gewonnenen Positionsdaten des Gleises mit der terrestrischen Gleisaufnahme zu vergleichen und daraus eine Validierung der Positionsbestimmung der Gleisaufnahmen mit GNSS Mehrantennen-Systemen durchzuführen. Dazu werden die Positionen der Antennen im lokalen System bestimmt und daraus die Transformationsparameter vom Bodyframe ins lokale System. Weiters können mit diesen Transformationsparametern die Positionen der Gleise vom Bodyframe ins lokale System transformiert werden. Im lokalen System werden die Schienenpositionen mit den terrestrischen Messungen der Schienen verglichen und deren Abweichungen bestimmt.

Bei der Auswertung der Positionen des Triebfahrzeuges, können einige Auswerteparameter variiert werden. Dadurch entsteht eine Vielzahl an Auswertevarianten, deren Genauigkeit besser oder schlechter ist sowie eine unterschiedliche Anzahl an Punkten, an deren die Position des Triebfahrzeuges bestimmt wird. In dieser Arbeit wird tiefer auf die variierbaren Parameter eingegangen und deren Einfluss auf die Positionsgenauigkeit, sowie auf die Anzahl der, nach der Auswertung, zur Verfügung stehenden Punkte.

Abstract

In order to determine the absolute position and geometry of the railtrack quickly and without great effort, Plasser&Theurer has developed a system in which a 4-antenna-GNSS-system as well as 4 profile sensors are installed on a traction vehicle for recording the rails and surveying their position. The 4-antenna GNSS system determines the position and direction of the traction vehicle and thus the location and rotation of the vehicle-specific coordinate system (bodyframe) in space. The positions of the 4 profile sensors are known in the bodyframe. With the help of the distance measurements from the profile sensors to the rails, the position of the rails in the bodyframe and further in space is known.

The aim of this thesis is to compare the track position data obtained from several measurements gained by terrestrial track recording and to validate the position determined by track recordings with a GNSS multi-antenna-system. For this purpose, the positions of the antennas in the local system are determined and the transformation parameters from the bodyframe to the local system are calculated. Furthermore, the positions of the tracks can be transformed from the bodyframe into the local system with these transformation parameters. In the local system, the track positions are compared with the terrestrial measurements of the rails and noted deviations are analyzed.

When evaluating the positions of the traction vehicle, some parameters can be varied. These results in a large number of variants, the accuracy of which is better or worse. Also the number of points at which the position of the traction vehicle is determined can be different. In this work, the variable parameters, and their influence on the position accuracy, as well as on the number of available points after the evaluation, are dealt with in more detail.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	8
2	GNSS-Grundlagen.....	10
2.1	Aufbau eines GNSS	10
2.1.1	Das Weltraumsegment.....	11
2.1.2	Das Bodensegment.....	12
2.1.3	Das Benutzersegment	12
2.2	Code- und Phasenmessung	13
2.2.1	Codemessung	13
2.2.2	Phasenmessung.....	13
2.3	Beobachtungsgleichung.....	15
2.3.1	Atmosphärische Effekte	15
2.3.2	Relativistische Effekte	17
2.3.3	Fehler der Satelliten- und der Empfängeruhren	17
2.3.4	Orbitfehler	18
2.3.5	Multipath-Effekte	18
2.3.6	Cycle Slips	18
2.3.7	Antennenphasenzentrum	19
2.4	Basislinienauswertung.....	20
2.5	RTK – Real Time Kinematik	21
2.5.1	Virtuelle Referenzstation VRS	22
2.5.2	Flächenkorrekturparameter FKP	22
2.5.3	Master Auxiliary-Konzept MAC.....	22
3	Koordinatensysteme und Transformationen.....	24
3.1	ITRF – International Terrestrial Referenz Frame	24
3.2	ETRF - European Terrestrial Referenz Frame	24
3.3	UTM – Universal Transverse Mercator System	24
3.4	Lokale Systeme	26
3.5	Fahrzeug spezifisches System (Bodyframe)	26
3.6	Helmert Transformation.....	27
3.7	Bestimmung der genäherten Transformationsparameter für die Helmert Transformation	28
3.8	Ausgleichung der genäherten Transformationsparameter für die Helmert Transformation	28

4	Sensorik und Testmessungen	30
4.1	Aufgabestellung	30
4.2	Erforderliche Sensoren	30
4.2.1	Positionierungs-System	30
4.2.2	Abstandssensoren	31
4.3	Messaufbau	31
4.4	Teststrecke.....	31
4.5	Messfahrten.....	33
5	Aufbereitung der GNSS-Daten	34
5.1	RTKlib	34
5.1.1	Positioning Mode	34
5.1.2	Frequencies	34
5.1.3	Elevationmask	35
5.2	Weitere Aufbereitung der Daten (Parametervariation).....	36
5.2.1	Positionsqualität.....	36
5.2.2	Toleranz der inneren Geometrie der GNSS-Antennen	38
6	Transformationen – Zusammenführung verschiedener Koordinatensysteme	39
6.1	Bestimmung der Transformationsparameter vom ITRF ins lokale System.....	40
6.2	Bestimmung der Transformationsparameter vom Bodyframe ins Lokale System ...	43
7	Vergleich GNSS-Positionen mit der terrestrischen Messung	44
7.1	Auswertung der Fahrten (kinematisch).....	47
7.1.1	Genauigkeit der Auswertevarianten	48
7.1.2	Punkteanzahl der Auswertevarianten.....	50
7.2	Auswertung der Stopps (statisch)	53
7.2.1	Genauigkeit der Auswertevarianten	53
7.2.2	Punkteanzahl der Auswertevarianten.....	57
8	Zusammenfassung	60
9	Literaturverzeichnis	62

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau eines GNSS.....	11
Abbildung 2: Die 3 Arten der Differenzbildung.....	20
Abbildung 3: Übersicht der EPOSA Referenzstationen	21
Abbildung 4: UTM-Abbildung [BEV (2021)].....	25
Abbildung 5: Bodyframe [Wikipedia (2021)].....	27
Abbildung 6: Anordnung der GNSS-Antennen [JAVAD (2021)]	30
Abbildung 7: Spurkranzanlagepunkt	31
Abbildung 8: Verlauf der Messstrecke	32
Abbildung 9: Prozess der Transformationen.....	40
Abbildung 10: Streckenübersicht	42
Abbildung 11: Vergleich Spurkranzanlagepunkt mit terrestrischer Messung	44
Abbildung 12: Genauigkeit der Auswertevarianten.....	48
Abbildung 13: Auswertung der kinem. Messung im Genauigkeitsbereich von 0 bis 0,1 m	49
Abbildung 14: Punkteanzahl der Auswertevarianten	51
Abbildung 15: Genauigkeit Stopps gesamt	54
Abbildung 16: Stopp 1 – Genauigkeit.....	55
Abbildung 17: Stopp 2 – Genauigkeit.....	55
Abbildung 18: Stopp 3 - Genauigkeit	56
Abbildung 19: Punkteanzahl der Stopps gesamt	58

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: GNSS-Satelliten Bahnparameter	11
Tabelle 2: Zeiten der Messfahrten	33
Tabelle 3: Zeiten der Stopps.....	33
Tabelle 4: Punkteanzahl der Cut-Offs der Fahrten.....	35
Tabelle 5: Punkteanzahl der Cut-Offs der Stopps	36
Tabelle 6: Punkteanzahl der Auswertevarianten	37
Tabelle 7: Transformationsparameter vom ITRF ins lokale System.....	41
Tabelle 8: Toleranzen	45
Tabelle 9: Auswertungsvarianten.....	46
Tabelle 10: Genauigkeiten und Standardabweichung der Bereiche.....	47
Tabelle 11: Genauigkeit der Cut-Offs bei den jeweiligen Stopps.....	57

Akronymverzeichnis:

BeiDou.....	chinesisches Satellitennavigationssystem
BL.....	Basislänge
DOP.....	Dilution of Precision
EGNOS.....	European Geostationary Navigation Overlay Service
EPOSA.....	Echtzeit Positionierung Austria
ETRF.....	European Terrestrial Referenz Frame
ETRS.....	European Terrestrial Referenz System
FKP.....	Flächenkorrekturparameter
GALILEO.....	Europäischen Satellitennavigationssystem
DGPS.....	Differential GPS
GHz.....	Gigahertz
GK.....	Gauß-Krüger
GLONASS.....	russisches Satellitennavigationssystem
GNSS.....	Global Navigation Satellite System
GPS.....	amerikanisches Satellitennavigationssystem
GRS80.....	Geodätisches Referenzsystem 1980
Hz.....	Hertz
ITRF.....	International Terrestrial Reference Frame
ITRS.....	International Terrestrial Referenz System
km.....	Kilometer
m.....	Meter
MAC.....	Master-Auxiliary-Konzept
MHz.....	Megahertz
ms.....	Millisekunden
NavIC.....	Indisches Satellitennavigationssystem
ns.....	Nanosekunden
PRN.....	Pseudorandom Noise
RINEX.....	Receiver Independent Exchange Format
RTK.....	Real Time Kinematic
s.....	Sekunden
QZSS.....	japanisches Satellitennavigationssystem
UERE.....	User Equivalent Range Error
UTM.....	Universal Transverse Mercator System
VRS.....	Virtuelle Referenzstation
WAAS.....	Wide Area Augmentation System
WGS84.....	World Geodetic System 1984

1 Einleitung

Der Zustand des Gleises hat großen Einfluss auf die Fahrdynamik eines Schienenfahrzeuges. Ändert sich kurzfristig während der Fahrt die horizontale Beschleunigung quer zur Gleisachse, empfinden Reisende dies als unangenehmen Ruck. Dies wirkt sich nicht nur negativ auf den Fahrkomfort aus, sondern erhöht auch die Abnutzung der Schienen und des Gleiskörpers und steigert den Verschleiß der Schienenfahrzeuge. Zusätzlich erhöht sich der Kraftstoffverbrauch des Schienenfahrzeugs, da die Ruckbewegung eine Bremswirkung auf das Fahrzeug ausübt. In Summe führt eine suboptimale Gleislage zu erhöhter Abnutzung sowohl der Schienen als auch der Fahrzeuge und folglich zu höheren Instandhaltungs-, Wartungs- und Betriebskosten.

Weiters ist die Kenntnis der absoluten Lage des Gleises von hohem Interesse. Die absolute Lage beschreibt die Lage eines Punktes oder in diesem Fall des Gleises in einem übergeordneten, globalen Koordinatensystem, wie zum Beispiel dem International Terrestrial Reference Frame (ITRF). Die absolute Lage des Gleises stützt zugleich die Ermittlung der absoluten Koordinaten von Einbauten, Bauwerken jeglicher Art und Infrastrukturelementen wie Signalen und Schildern in einem konsistenten übergeordneten Koordinatenrahmen. Derzeit sind Einbauten meist nur relativ zur Gleisachse bekannt, sprich durch den Gleiskilometer und einen Querabstand zur Gleisachse gegeben. Mit Hilfe der Aufnahme des Gleises in absoluten Koordinaten, kann die Gleisgeometrie ermittelt werden und somit können den Objekten und Elementen, welche bislang nur relative gleisachsbezogene Koordinaten hatten, absolute Koordinaten zugewiesen werden.

Dies ist vor allem für weitere Planungs- und Bauvorhaben wichtig. Für die Planung von Neu-, Umbau und Instandhaltungsarbeiten müssen genaue Aufzeichnungen der Lage der Bauwerke vor Ort vorhanden sein. Sind diese Aufzeichnungen nicht oder nur in unzureichender Genauigkeit vorhanden, muss der Bereich, in dem die Bauarbeiten stattfinden sollen, vorab vermessen werden, bevor mit der Detailplanung begonnen werden kann.

Die Einmessung des Gleiskörpers stützte sich üblicherweise auf terrestrische Methoden wie z.B. eine Tachymetermessung. Bei dieser Methode wird idealerweise jedoch das Gleis gesperrt, um es dauerhaft betreten zu können. Der Messfortschritt bewegt sich in einem Rahmen von 1–2 km pro Tag. Sollte das Gleis aus wirtschaftlichen Gründen nicht gesperrt werden können, muss mit zusätzlichen Personalkosten für Sicherheitspersonal gerechnet werden. Außerdem reduziert sich die Messleistung, weil für jeden vorbeifahrenden Zug das Gleis geräumt werden muss. Somit steht der Messfortschritt indirekt proportional zur Auslastung des Gleises und kann im schlechtesten Fall gegen Null sinken.

Daher hat die Firma Plasser&Theurer [Plasser & Theurer (2021)] eine neue Methode entwickelt, welche keine Auswirkungen auf den laufenden Bahnbetrieb hat und weitaus effizienter ist. Mit einem 4-Antennen-GNSS-Messsystem und Profilsensoren, welche auf einem Triebfahrzeug montiert sind, kann das Gleis auf wenige Zentimeter genau vermessen werden. Die GNSS-Antennen sind für die Lokalisierung des Triebfahrzeugs zuständig und die Profilsensoren erfassen den Spurkranzanlagepunkt, ein markanter Punkt auf der Schiene, im

Millimeterbereich. Über die Koordinaten der GNSS-Antennen können die Gleispunkte ins ITRF transformiert werden und bestimmen somit die absolute Lage des Gleises.

Das Kapitel 2 dieser Arbeit beschäftigt sich generell mit den verfügbaren Satellitennavigationssystemen und der GNSS-Positionierung. In Kapitel 3 werden die zugrundeliegenden Koordinatensysteme besprochen. Kapitel 4 beschäftigt sich mit der Sensorik, mit welcher die GNSS-Positionsdaten des Fahrzeuges und die Abstände vom Fahrzeug zu den Schienen aufgenommen wurden. Im Kapitel 5 wird auf die Aufbereitung der GNSS-Daten, sowie auf deren Parameter, eingegangen. Das Kapitel 6 zeigt die Transformationen zwischen den beteiligten Koordinatensystemen. In Kapitel 7 wird auf die verschiedenen Auswertevarianten der GNSS-Positionsdaten eingegangen und mit den terrestrischen Messungen verglichen. Im Kapitel 8 findet sich die Zusammenfassung der Erkenntnisse dieser Arbeit.

2 GNSS-Grundlagen

In diesem Kapitel wird auf den Aufbau eines Global Navigation Satellite Systems (GNSS) eingegangen sowie auf die Code- und Phasenmessung derer Signale. Die Beobachtungsgleichung zeigt die maßgebenden Fehlereinflüsse und Effekte, welche auf die Signale wirken und gibt die Größenordnung der Streckenfehler an mit welchen zu rechnen ist, wenn die jeweiligen Fehlereinflüsse nicht korrigiert oder reduziert werden. Im letzten Abschnitt wird auf die verschiedenen Konzepte der Positionierungsmethode Real Time Kinematik (RTK) eingegangen.

2.1 Aufbau eines GNSS

Derzeit sind 4 globale Satellitennavigationssysteme (GNSS) aktiv. Dies sind das amerikanische GPS, das europäische GALILEO, das russische GLONASS und das von China betriebene System BeiDou. Daneben sind noch nationale oder kontinentale Unterstützungssysteme (Overlaysysteme) wie das europäische EGNOS, das nordamerikanische WAAS, das japanische QZSS oder das indischen NavIC aktiv. Ein GNSS wird häufig vereinfacht durch 3 Segmente beschrieben, wie in Abbildung 1 schematisch dargestellt. Diese Segmente umfassen einerseits das Weltraumsegment, welches die Navigationssatelliten beinhaltet, und andererseits das Bodensegment, dem die Kontroll- und Beobachtungsstationen angehören. Zudem wird die Vielzahl der GNSS-Empfangeinheiten (Receiver) zumeist im Nutzersegment zusammengefasst.

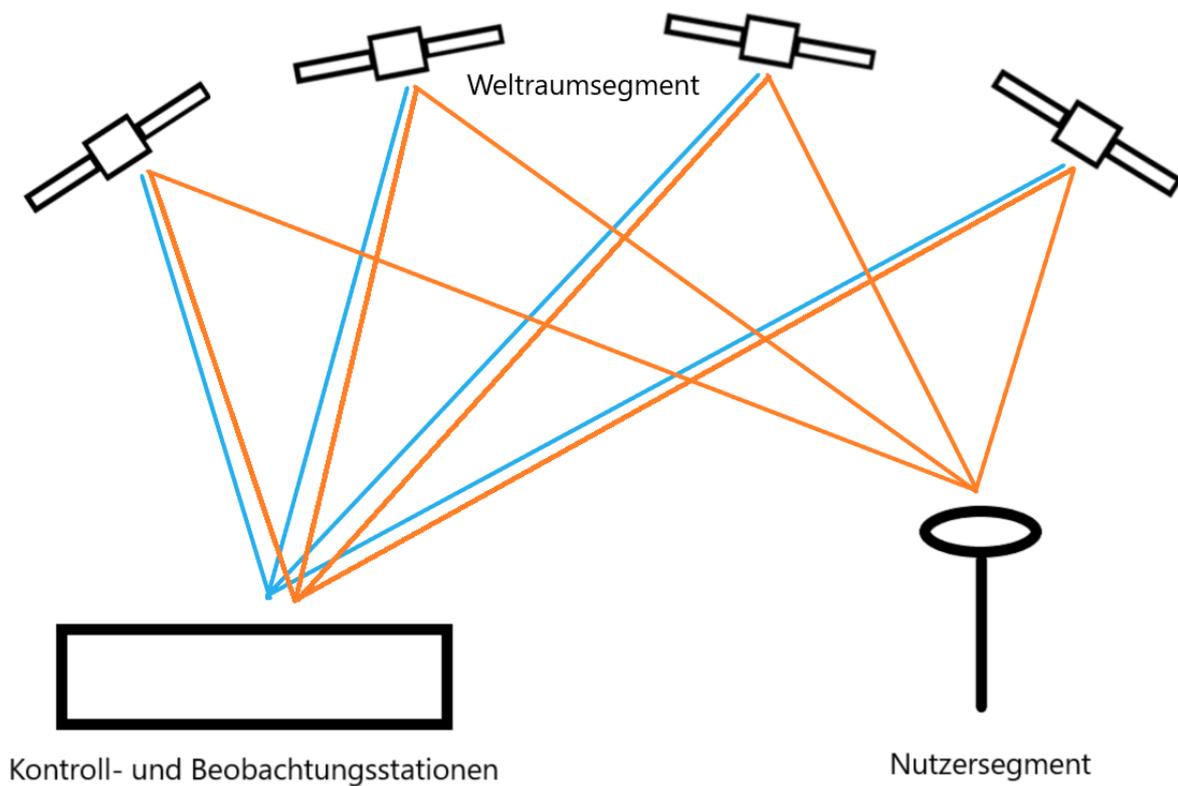


Abbildung 1: Aufbau eines GNSS

2.1.1 Das Weltraumsegment

Als Weltraumsegment versteht man die Summe der im All befindlichen Satelliten, welche sich in 3 oder 6 Bahnebenen um die Erde bewegen.

In jeder Bahnebene befinden sich 4 oder mehr aktive Satelliten. Um jederzeit und überall auf der Erde eine Positionsbestimmung zu ermöglichen, muss ein GNSS mindestens 24 aktive Satelliten betreiben. GPS und GLONASS betreiben jederzeit zwischen 24-32 Satelliten, GALILEO in der Vollausbaustufe bis zu 30 und BeiDou bis zu 35 Satelliten. Falls es zu Ausfällen kommt, kann der defekte Satellit umgehend durch einen einsatzfähigen Satelliten ersetzt werden.

Zusätzlich unterscheiden sich die GNSS durch die Bahnparameter der Satelliten. Die jeweils charakteristischen Parameter sind in Tabelle 1: GNSS-Satelliten Bahnparameter angeführt.

GNSS	GPS	GLONASS	Galileo	BeiDou
Mittlere Bahnhöhe [km]	20200	19100	23222	21528
Bahnneigung [°]	55	64.8	56	55
Anzahl der Satelliten	24-32	24-32	30	35
Anzahl der Bahnebenen	6	3	3	3
Umlaufzeit	11h58m	11h15.7m	14h05m	12h35m

Tabelle 1: GNSS-Satelliten Bahnparameter

Die Satelliten senden kontinuierlich Signale in Form von elektromagnetischen Wellen zur Erdoberfläche. Diese werden vom Bodensegment und Benutzersegment empfangen und weiterverarbeitet. [Kaplan, E. & Hegarty]

2.1.2 Das Bodensegment

Das Bodensegment besteht aus Kontroll- und Beobachtungsstationen, welche über die gesamte Erde verteilt sind, um die Satelliten jederzeit beobachten und steuern zu können. Aus den Beobachtungen zu den Satelliten können Bahn- und Uhrenfehler der Satelliten abgeleitet werden. Daraus werden Bahn- und Uhrkorrekturdaten erstellt. Diese Korrekturdaten werden im Anschluss an die Satelliten hochgeladen und diese senden die Korrekturdaten in Form eines Teils der Navigationsnachricht an die Benutzer weiter. [Kaplan, E. & Hegarty]

2.1.3 Das Benutzersegment

Empfangen werden die Signale der Satelliten von GNSS-Empfängern. Diese finden häufig Anwendung in Smartphones, Verkehrsnavigationssystemen und Geräten für geodätische Vermessungsarbeiten. Der GNSS-Empfänger zeichnet die Signale der Satelliten auf, entschlüsselt die Navigationsnachricht und bestimmt die Pseudostrecken zu den Satelliten. Generell sind zumindest 4 gleichzeitig beobachtete Satelliten notwendig, um die Position des Empfängers und den Empfängeruhrfehler bestimmen zu können. Je mehr Satelliten empfangen werden, desto genauer kann die Position geschätzt werden. [Kaplan, E. & Hegarty]

2.2 Code- und Phasenmessung

Es gibt 2 verschiedene Optionen aus den GNSS-Signalen die Pseudostrecke zu einem Satelliten zu bestimmen, die Codemessung und die Phasenmessung. Diese unterscheiden sich im Wesentlichen in ihrer Komplexität und Genauigkeit. Die Codemessung, das einfachere Verfahren, liefert Genauigkeiten im Meter-Bereich. Die Phasenmessung, das aufwändigere Verfahren, hat eine Streckenmessgenauigkeit von 1-2 mm, sofern alle Fehlereinflüsse korrekt modelliert und die Phasenmehrdeutigkeiten korrekt fixiert werden.

Die Basislinienauswertung (siehe Kap. 2.4) basiert auf Kombination von Messungen zwischen mehreren Empfängern, um Fehlereinflüsse zu reduzieren oder zu eliminieren.

2.2.1 Codemessung

Bei der Codemessung wird im GNSS-Receiver eine Replica des vom Satelliten ausgesendeten Signals erstellt und über das eintreffende Signal verschoben bis die beiden übereinstimmen. Da in der Navigationsnachricht der Sendezeitpunkt des Codes enthalten ist, kann der Receiver den Sendezeitpunkt vom Empfangszeitpunkt abziehen und erhält dadurch die Zeitspanne, welche das Signal für den Weg vom Satelliten zum Empfänger benötigt hat. Wird diese Zeitspanne mit der Lichtgeschwindigkeit multipliziert ergibt sich daraus die Distanz, die das Signal im Vakuum zurückgelegt hätte oder auch die Pseudostrecke. Diese Distanz wird auch Code-Pseudostrecke genannt, da sie von der geometrischen Distanz noch wegen Uhrfehlern und andere Fehlereinflüsse abweicht. [Kaplan, E. & Hegarty]

2.2.2 Phasenmessung

Der Satellit erzeugt ein Phasensignal mit der Frequenz f zum Aussendezeitpunkt T^S mit einem Instrumentenfehler α^S . Dieses Phasensignal wird vom Empfänger aufgenommen, jedoch ist die Anzahl der vollen Wellenlängen N^S_E (Mehrdeutigkeiten) zwischen Satelliten und Empfänger nicht bekannt.

Die Phasenlage bei der Ankunft beim Empfänger setzt sich zusammen aus.

$$\Phi^S_E = fT^S + \alpha^S - N^S_E \quad (2.1)$$

Analog zur Codemessung erzeugt der Empfänger eine eigene Referenzphase. Wenn das Satellitensignal Φ^S_E beim Empfänger zum Zeitpunkt T^E ankommt, gilt:

$$\Phi_E = fT^E + \alpha_E \quad (2.2)$$

wobei α_E für die Instrumentenfehler des Empfängers stehen. Die Phasenmessung ist die Differenz zwischen der Referenzphase des Empfängers und der eintreffenden Phase des Satellitensignals.

$$\begin{aligned}\phi^{S_E} &= \Phi_E - \Phi^{S_E} & (2.3) \\ &= (fT_E + \alpha_E) - (fT^S + \alpha^S - N^{S_E}) \\ &= f(T_E - T^S) + (\alpha_E - \alpha^S + N^{S_E})\end{aligned}$$

Durch Multiplikation mit der Wellenlänge λ ergibt sich die Beobachtungsgleichung (2.4) für die Phasenstrecke L^{S_E} in Einheit [m]. Die Differenz von $T_E - T^S$ wird mit der Lichtgeschwindigkeit c multipliziert.

$$\begin{aligned}L^{S_E} &= \lambda \phi^{S_E} & (2.4) \\ &= c(T_E - T^S) + \lambda(\alpha_E - \alpha^S + N^{S_E}) \\ &= c(T_E - T^S) + \lambda b^{S_E}\end{aligned}$$

mit dem Term der Mehrdeutigkeiten

$$b^{S_E} = (\alpha_E - \alpha^S + N^{S_E}) \quad (2.5)$$

Aufgrund der Instrumentenfehler α_E und α^S ist der Term der Mehrdeutigkeiten nun nicht ganzzahlig.

Folgend kann die Gleichung der Phasen-Pseudostrecke L^{S_E} um den Term der Mehrdeutigkeiten λb^{S_E} und die Uhrfehler δt_E und δt^S erweitert werden.

$$\rho^{S_E} = \sqrt{(X^S - X_E)^2 + (Y^S - Y_E)^2 + (Z^S - Z_E)^2} \quad (2.6)$$

$$L^{S_E} = \rho^{S_E} + c \delta t_E - c \delta t^S + \lambda b^{S_E} \quad (2.7)$$

Die Genauigkeit der Phasenmessung beträgt 1-2 mm und ist somit um den Faktor 1000 besser als die Codemessung. [Kaplan, E. & Hegarty]

2.3 Beobachtungsgleichung

Den Zusammenhang zwischen der wahren Distanz zum Satelliten, der Pseudostrecke und den primären Fehlereinflüssen zeigt die erweiterte Beobachtungsgleichung für die Code- und Phasenmessung.

Die Beobachtungsgleichungen der Code- und Phasenmessung lauten:

$$P_{E,i}^S = \rho_{E,i}^S + \Delta_{E,iono,i}^S + \Delta_{E,tropo}^S + \Delta_{E,rel}^S + c \Delta t_E + c \Delta t^S + \varepsilon \quad (2.8)$$

$$L_{E,i}^S = \rho_{E,i}^S - \Delta_{E,iono,i}^S + \Delta_{E,tropo}^S + \Delta_{E,rel}^S + c \Delta t_E + c \Delta t^S + N\lambda_i + \varepsilon \quad (2.9)$$

Sie setzen sich zusammen aus:

- $P_{E,i}^S$ der Code-Pseudostrecke zwischen Empfänger E und Satellit S auf der Frequenz i
- $\rho_{E,i}^S$ der geometrischen Distanz zwischen dem Satelliten und dem Empfänger
- $\Delta_{E,iono,i}^S$ der ionosphärischen Verzögerung auf Frequenz i
- $\Delta_{E,tropo}^S$ der troposphärischen Verzögerung
- $\Delta_{E,rel}^S$ den relativistischen Effekten
- c der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum
- Δt_E dem Empfängeruhrfehler
- Δt^S dem Satellitenuhrfehler und
- N Ambiguity (Mehrdeutigkeit)
- λ_i Wellenlänge des Signals
- ε sonstiger Fehler

Die primären Fehlereinflüsse werden hauptsächlich verursacht durch:

- Ionosphäre
- Troposphäre
- Relativistische Effekte
- Fehler der Satelliten- und der Empfängeruhr
- Orbitfehler
- Multipath-Effekte
- Cycle Slips
- Antennenphasenzentrum

Auf diese Einflüsse wird im Weiteren eingegangen. [Kaplan, E. & Hegarty]

2.3.1 Atmosphärische Effekte

Die Satelliten senden elektromagnetische Wellen aus, welche durch die Atmosphäre zum Empfänger gelangen. Am Weg durch die Atmosphäre breiten sich die Wellen nach dem Fermatschem Prinzip aus. Sie gehen nicht entlang der kürzesten geometrischen Distanz, sondern den Weg mit der kürzesten Laufzeit. Dies bewirkt, beim Übergang von einem dünneren in ein dichteres Medium eine Brechung des Laufweges zum Lot der Trennfläche der

Medien. Speziell die Ionosphäre und Troposphäre haben einen großen Einfluss auf die Messgenauigkeit.

2.3.1.1 Ionosphäre

In der Ionosphäre werden durch die Sonneneinstrahlung Ionen freigesetzt. Dies führt zu einer Ionisierung der Atmosphäre. Die Ionisierung kann am Tag bei Sonneneinstrahlung um den Faktor 10 höher sein als bei Nacht. Diese freien Elektronen werden durch das elektromagnetische Feld der Erde in Bewegung gesetzt und induzieren selbst wiederum ein elektromagnetisches Feld. Dieser Effekt hat einen signifikanten Einfluss auf die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen. Dies führt zu einer frequenzabhängigen Verzögerung der Signallaufzeit und einer Beschleunigung der Phasenausbreitung. Zusätzlich treten folgende Effekte auf:

- Krümmung des Ausbreitungsweges durch die Refraktion
- Signalverzerrung wegen Dispersion
- Variable Dopplerverschiebung der Signalfrequenz
- Verdrehung der Polarisierung
- Signalstärken- und Phasenfluktuationen aufgrund unregelmäßiger Aufspaltung und Rekombination der Signalwege

Typische Abweichungen bewegen sich im Bereich von 2 bis 8 m in Zenitrichtung, bei tiefstehenden Satelliten bis zu 50 m. Maximale Abweichungen, bei tief stehenden Satelliten können sogar 150 m betragen.

Bei Einzelfrequenzempfängern ist die Ionosphäre für die Genauigkeitslimitation maßgebend. Bei Mehrfrequenzempfängern kann aufgrund der Dispersion der Fehlereinfluss der Ionosphäre mit Hilfe von Linearkombinationen der Beobachtungen, auf verschiedenen Frequenzen, stark reduziert werden.

2.3.1.2 Troposphäre

Die Troposphäre ist für Radiowellen mit einer Frequenz unter 15 GHz nicht dispersiv. Hier wird die Dichte der Atmosphäre vor allem durch den Luftdruck, Feuchte und Temperatur bestimmt. Der hydrostatische Anteil der Luft ist für 90% der troposphärischen Laufzeitverzögerung verantwortlich und mit einfachen Modellen gut präzifizierbar.

Der feuchte Anteil wird durch den Wasserdampf in der Luft bestimmt und ist für 10% der Laufzeitverzögerung verantwortlich. Der feuchte Anteil variiert räumlich und zeitlich stark und ist somit kaum präzifizierbar.

Die troposphärische Laufzeitverzögerung beträgt für Stationen nahe Meeressniveau in Zenitrichtung ca. 2.2 m. Der Einfluss des troposphärischen Streckenfehlers auf den Positionsfehler, bei Anwendung von apriori Modellen, kann bis zu 0.2 m betragen.

2.3.2 Relativistische Effekte

Die Satelliten bewegen sich in Relation zum Empfänger mit einer deutlich höheren Geschwindigkeit und auf sie wirkt ein geringeres gravitatives Potential. Dies hat 2 Effekte zu Folge, welche die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie beschreiben.

Laut der speziellen Relativitätstheorie verläuft die Zeit in einem bewegten System langsamer aus Sicht eines Beobachters in einem ruhenden System. Sprich, die Uhr im Satellitensystem geht langsamer aus Sicht des Beobachters auf der Erdoberfläche.

Im Gegensatz dazu besagt die allgemeine Relativitätstheorie, dass die Zeit bei geringerem Gravitationspotential schneller vergeht als bei höherem. Somit wirkt dieser Effekt dem Effekt der speziellen Relativitätstheorie entgegen.

In Summe überwiegt der Effekt der allgemeinen Relativitätstheorie und die Zeit im Satellitensystem läuft schneller als auf der Erdoberfläche. Um dem entgegenzuwirken wird die Frequenz der Signale, die der Satellit aussendet, um ca. 0.005 Hz verringert. Somit kommen die Signale mit einer Frequenz von exakt 10.23 MHz an der Erdoberfläche an.

Durch die Abplattung der Erde und die daraus folgende elliptische Bahn der Satelliten, verändert sich entlang der Satellitenbahn die Geschwindigkeit und das gravitative Potential in welchem sich der Satellit bewegt. Dies bedingt eine periodische Veränderung der Geschwindigkeit, mit der die Zeit im Satellitensystem vergeht. Der daraus entstehenden Fehler kann bis zu 70 ns oder 21 m betragen. Diese periodischen Effekte müssen vom Empfänger korrigiert werden.

Ein weiterer Effekt, der aufgrund der Rotation der Erde entsteht, ist der Sagnac-Effekt. In der Zeit, in der sich das Signal vom Satelliten zum Empfänger auf der Erdoberfläche bewegt rotiert die Erde am Äquator ca. 30 m weiter. Somit bewegt sich das Signal aus Sicht eines erdfesten Koordinatensystems entlang einer gekrümmten Linie. Die Auswirkungen des Sagnac-Effekts können mit Hilfe der „Sagnac-Korrektur“ behoben werden.

2.3.3 Fehler der Satelliten- und der Empfängeruhren

Satellitenuhren sind nicht perfekt mit der GPS-Zeit synchronisiert, aber weisen eine hohe Frequenzstabilität im Bereich von 10^{-13} bis 10^{-14} auf. Die Abweichung wird vom Kontrollsegment unter 1 ms gehalten, beträgt aber üblicherweise nur wenige Nanosekunden. Die Navigationsnachricht enthält Koeffizienten für ein einfaches Fehlermodell, mit dessen Hilfe die Satellitenuhrfehler kleiner 5 ns gehalten werden können. Dies entspricht einer Genauigkeit der Streckenmessung von 1.5 m.

Präzise Ephemeriden enthalten Zeitreihen der Satellitenuhrfehler und dienen als Grundlage zur Interpolation. Mit dieser Zeitreiheninterpolation kann für Postprocessinganwendungen eine Genauigkeit von < 0.1 ns erreicht werden, dies entspricht einem Streckenfehler von 0.03 m.

Der Fehler der Empfängeruhr ist nicht relevant, da die Empfängeruhrzeit bei der Berechnung der Position mit geschätzt und korrigiert wird.

2.3.4 Orbitfehler

Orbitfehler sind geometrische Abweichungen der wahren Satellitenposition zur Broadcast Position. Ursachen dafür können sein:

- der Strahlungsdruck der Sonne
- Abweichungen der Modelle des Erdschwerefeldes zur Realität
- Veränderung des Erdschwerefeldes durch die Gezeiten

Broadcast-Orbits sind extrapolierte Orbit-Daten des Satelliten und werden mit der Navigationsnachricht vom Satelliten in Echtzeit ausgesendet. Der UERE (User Equivalent Range Error) fasst die Effekte und Fehler der Beobachtungsgleichung durch die Wurzel der Summe derer Quadrate zusammen und gibt einen statistischen Wert der Genauigkeit der Pseudostrecke in Meter.

Bei Verwendung von Broadcast Orbits beträgt der verbleibende Fehler der Streckenmessung ca. 1 m.

2.3.5 Multipath-Effekte

Multipath-Effekte entstehen, wenn der Weg des Signals vom Satelliten zum Empfänger durch die Umgebung des Empfängers beeinflusst wird. Dies kann durch Reflexionen an glatten Oberflächen verursacht werden. Dadurch wirkt der Weg des Signals scheinbar länger und die Laufzeit verzögert.

Diese Reflexion kann an künstlichen Bauwerken, wie Gebäude und Straßen, sowie an natürlichen Strukturen wie zum Beispiel Felswände stattfinden. Wenn ein direktes Signal vom Satelliten empfangen wird und der Multipath-Effekt zusätzlich auftritt, kann dieser in den meisten Fällen erkannt werden, da das abgelenkte Signal verzögert und meist mit einer schwächeren Intensität am Empfänger eintrifft. Die Intensität des Signals wird durch die Reflexion reduziert und der Signal to Noise-Ratio steigt. Der Signal to Noise-Ratio beschreibt das relative Verhältnis von Stärke des Signals zur Stärke des Rauschens.

Wird jedoch kein direktes Signal des Satelliten empfangen, sondern nur das abgelenkte verursacht dies eine Laufzeitverzögerung und somit einen Fehler der Pseudostrecke von mehreren 10er-Metern bei der Codemessung und maximal 5 cm bei der Phasenmessung, (dies entspricht $\frac{1}{4}$ der Wellenlänge).

2.3.6 Cycle Slips

Cycle Slips sind Phasensprünge um eine ganzzahlige Anzahl an Wellenlängen in der Phasenmessung. Sie äußern sich durch plötzliche Änderungen in den Mehrdeutigkeiten. Diese können durch atmosphärische Störungen oder kurz auftretende Unterbrechungen des Signals

auftreten. Je nachdem über wieviele Wellenlängen die Phase springt, kann der Fehler im Meterbereich liegen.

2.3.7 Antennenphasenzentrum

Der Fehler, der durch eine fehlerhaft angenommene Lage des Phasenzentrum entsteht, ist in Relation zu den anderen Fehlern sehr gering. In den meisten Fällen kann er jedoch durch genaue Kenntnis des Phasenzentrums ausgeschlossen werden (Herstellerangaben).

2.4 Basislinienauswertung

Durch die Bildung von Differenzen zwischen der Rovermessung und der Messung an der Referenzstation kann eine Basislinienauswertung erfolgen. Es können einfache, doppel- und dreifach- Differenzen gebildet werden, siehe Abbildung 2. Die Differenzbildung kann auf 3 unterschiedliche Arten durchgeführt werden: zwischen Empfängern, Satelliten und Zeitepochen. Durch die Differenzbildung können einige Fehler, welche in der Beobachtungsgleichung beschrieben werden, reduziert oder eliminiert werden.

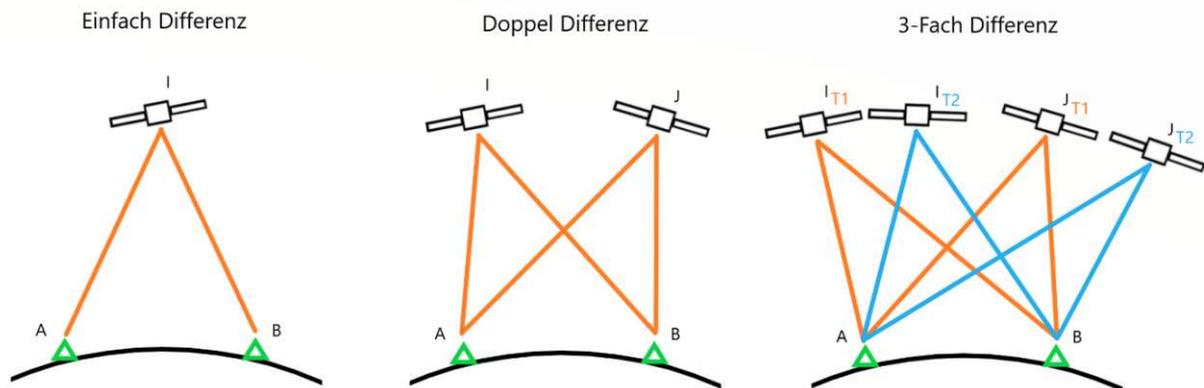


Abbildung 2: Die 3 Arten der Differenzbildung

Die einfache Differenz bezeichnet eine Streckendifferenz zwischen 2 Empfängerpositionen zu den gleichen Satelliten.

Die Basislinienauswertung erfolgt durch die Differenzbildung von Messungen an zwei Orten zu einem Satelliten und kann auf Code- und Phasenmessungen angewandt werden. Durch die Bildung von Einfachdifferenzen wird der Satellitenuhrfehler eliminiert. Weitere Effekte wie unten aufgelistet, können zumindest reduziert werden. [Hofmann-Wellenhof,

- Bahndatenfehler (vernachlässigbar bei $BL < 100$ km)
- Beitrag der Satellitenorientierung zum Phase-wind-up
- Ionosphärischer Ausbreitungseffekt (i.d.R vernachlässigbar bei $BL < 10$ km)
- Troposphärische Laufzeitverzögerung (reduziert auf wenige cm, falls BL kurz (gleiche Wettersituation) und geringer Höhenunterschied (< 500 m))

Doppeldifferenzen werden aus den Beobachtungen zwischen 2 Satelliten und 2 Empfängern ermittelt. Es wird die Differenz zwischen zwei Einfachdifferenzen zu zwei Satelliten in einer Epoche gebildet. Hierbei werden die Empfängeruhrfehler eliminiert (Satellitenuhrfehler wurden bereits bei der Einfachdifferenz eliminiert). Die troposphärischen Einflüsse auf das Signal können reduziert und bei kurzen Basislinien vernachlässigt werden. Weiters können Fehler bei der Generierung des Signals eliminiert werden.

Bei den Dreifachdifferenzen wird die Differenz aus 2 Doppeldifferenzen gebildet. Die Beobachtungen der Doppeldifferenzen müssen zwischen denselben Satelliten und Empfängern gemessen werden, der Unterschied zwischen den Doppeldifferenzen liegt in der Epoche. Dadurch können mögliche Cycle-slips erkannt werden.

2.5 RTK – Real Time Kinematik

Bei RTK werden Informationen von einer oder mehreren weiteren Referenzstationen in die Positionsbestimmung mit eingebunden. An Referenzstationen stehen Referenzempfänger an gut bekannten Positionen und führen Streckenmessungen durch. Aus der Differenz der gemessenen Strecken und der aus den a priori Koordinaten der Satelliten und Referenzstationen, werden Korrekturwerte für die Pseudostrecken zu den beobachteten Satelliten erstellt. Mit diesen Korrekturwerten werden in Echtzeit oder im Postprocessing die Messungen des Rovers verbessert.

Die Referenzstation sollte eine geringe Distanz zum Rover aufweisen, um sicherzustellen, dass die Fehlereinflüsse sehr ähnlich sind. Fehler aus folgenden Quellen können reduziert werden:

- Ionosphäre
- Troposphäre

Bei den Satellitenuhrfehlern und Satellitenorbitfehlern spielt die Distanz zwischen Referenzstation und Rover eine untergeordnete Rolle.

Bei einer einzelnen Referenzstation muss, aufgrund des ionosphärischen Fehlers, die Distanz zum Rover verhältnismäßig klein gehalten werden. Eine Alternative bieten Referenzstationsnetze. Durch die hohe Anzahl an Referenzstationen, welche räumlich gut verteilt sind, können Fehlermodelle für das gesamte betrachtete Gebiet erstellt werden. Daraus können die Korrekturdaten für die Position des Rovers interpoliert werden und es sind Distanzen von 50 – 100 km zur nächsten Referenzstation möglich ohne einen Verlust der Positionierung [Kaplan, E. & Hegarty]. Abbildung 3 zeigt beispielhaft das Referenzstationsnetz von EPOSA. [EPOSA (2021):]



Abbildung 3: Übersicht der EPOSA Referenzstationen

Die Modellbildung und Interpolation der Korrekturwerte an der Position des Rovers kann mithilfe verschiedener RTK-Konzepte durchgeführt werden. Folgende 3 Konzepte sind die Prominentesten:

- Virtuelle Referenzstation (VRS)
- Flächenkorrekturparameter (FKP)
- Master-Auxiliary-Konzept (MAC)

Im Wesentlichen unterscheiden sich die Konzepte nur dadurch, wo die Interpolation der Korrekturmodelle erfolgt und der Großteil der Berechnungen durchgeführt wird. Die Ergebnisse der Konzepte sollten im Idealfall dieselben sein. [Wanninger, L (2006).

2.5.1 Virtuelle Referenzstation VRS

Beim Konzept der VRS sendet der Rover seine Näherungsposition an die Zentrale des Referenzstationsnetzbetreibers. Diese rechnet mithilfe eines Interpolationsmodells und der Näherungsposition des Rovers, VRS-Beobachtungen für die Position des Rovers und schickt diese an den Rover. Aus diesen VRS-Beobachtungen ermittelt der Rover seine Position.

In diesem Fall liegt der Großteil des Rechenaufwandes und das Interpolationsmodell in der Zentrale des Betreibers.

2.5.2 Flächenkorrekturparameter FKP

Das Konzept der Flächenkorrekturparameter ist ein ähnliches Vernetzungskonzept wie das der VRS. Aus einem Netz von Referenzstationen werden für jeden Satelliten Polynomkoeffizienten für ein Streckenfehlermodell berechnet. Diese Polynomkoeffizienten werden an den Rover gesendet und dieser wertet das Modell aus und addiert das Ergebnis zu seinen Streckenmessungen. Mit Hilfe der so gebildeten Strecken wird die Roverposition berechnet.

Flächenkorrekturparameter haben den Vorteil, dass sie nicht für jeden Nutzer einzeln bestimmt werden müssen und für eine Vielzahl an Nutzern verwendet, werden können. Somit wird der Rechenaufwand für den Anbieter reduziert. Die Datenmenge, die an den Rover geschickt wird, erhöht sich etwas im Vergleich zum VRS-Konzept. Jedoch müssen keine Daten vom Rover an den Anbieter übermittelt werden. Ein großer Teil des Rechenaufwandes muss durch den Rover durchgeführt werden, da dieser die Korrekturen berechnet.

2.5.3 Master Auxiliary-Konzept MAC

Bei diesem Konzept sendet der Rover seine Positionsdaten an den Anbieter. Dieser bestimmt die nächstgelegene Referenzstation zum Rover (Master-Station) und schickt die Beobachtungsdaten aller Satelliten, die an der Master-Station empfangen werden zum Rover. Zusätzlich werden von den umliegenden Referenzstationen (Auxiliary-Stations) von jenen Satelliten, welche auch von der Master-Station empfangen werden, Streckenkorrekturen berechnet und an den Rover geschickt. Am Rover werden die Korrekturen interpoliert und die Berechnungen zur Positionskorrektur durchgeführt.

Bei diesem Konzept wird der Großteil der Berechnungen am Rover durchgeführt. Ein spezielles Modell ist nicht notwendig da nur Beobachtungsdifferenzen ausgesandt und interpoliert werden. Die Datenmenge, welche an den Rover gesendet wird, ist ebenfalls größer als bei den anderen Konzepten.

3 Koordinatensysteme und Transformationen

3.1 ITRF – International Terrestrial Referenz Frame

Der ITRF ist die Realisierung des ITRS (International Terrestrial Referenz System). Das ITRS ist ein kartesisches Koordinatensystem und definiert durch seinen Ursprung im Baryzentrum der Erde, seine Z-Achse, welche in Richtung des mittleren Nordpols der Jahre 1900-1905 zeigt und seine X-Achse, welche durch den Meridian von Greenwich verläuft.

Realisiert wird der ITRF durch mehrere hundert Fundamentalstationskoordinaten weltweit. Da diese Stationen der Kontinentalverschiebung unterliegen werden stetig Messungen mit den modernen geodätischen Weltraumverfahren, GNSS, SLR, VLBI oder DORIS durchgeführt, um die Veränderung der Stationskoordinaten berechnen zu können. In regelmäßigen Abständen werden die aktuellen Stationskoordinaten durch eine neue Version des ITRF veröffentlicht. Diese tragen die Bezeichnung „ITRF“ und ein 2 bzw. 4-stelliges Kürzel, welches das Jahr angibt, dessen Messungen noch zur Berechnung beigetragen haben. Die GNSS-Koordinatenlösungen in dieser Arbeit beziehen sich auf den ITRF 2014 (Epoche 2010). Die aktuelle Realisierung des ITRF ist der ITRF2020, welcher in der zweiten Jahreshälfte 2022 veröffentlicht wurde. Als Referenzellipsoid wurde das GRS80 festgelegt.

3.2 ETRF - European Terrestrial Referenz Frame

Der ETRF ist ein europäischer Referenzrahmen und die Realisierung des ETRS, European Terrestrial Referenz System. Das ETRS hat, wie das ITRS, seinen Ursprung im Baryzentrum der Erde und die Richtungen der Achsen sind gleich denen des ITRS zur Epoche 1989. Als Referenzellipsoid dient ebenfalls das GRS80. Zur Epoche 1989.0 wurden die ETRF-Koordinaten der Stationen festgehalten und somit verschiebt sich das ETRF zum ITRF um die Plattenverschiebung der eurasischen Kontinentalplatte. Das hat den Vorteil, dass die ETRF-Koordinaten der Stationen in Europa stabil gehalten werden können und sich nicht wie die eurasische Kontinentalplatte zum ITRF um jährlich ca. 2.5 cm verschieben. [EUREF (2021).

Seit 2011 sind auch in Österreich ETRF-Koordinaten amtlich und werden in die UTM-Projektion abgebildet, auf welche im nächsten Kapitel eingegangen wird.

3.3 UTM – Universal Transverse Mercator System

UTM ist eine Meridianstreifenprojektion. Hierfür wird die Erde in 60 Zonen mit einer Ausdehnung von jeweils 6° Länge geteilt, beginnend mit der Zone 1, welche sich von 180° bis 174° westlich von Greenwich erstreckt. Die Zentralmeridiane der Zonen beginnen somit bei 177° westlich von Greenwich und setzen sich in 6° Schritten Richtung Osten fort. Österreich liegt in den Zonen 32 (Zentralmeridian 9° östlich von Greenwich) und 33 (Zentralmeridian 15° östlich von Greenwich). Die Zonen werden in Süd-Nord-Richtung in 8° Schritten unterteilt. Beginnend bei 80° südlich werden die Breitenzonen mit den Buchstaben „C“ bis „X“ ohne „I“ und „O“ bezeichnet. Österreich liegt in den Breitenzonen „T“ und „U“, siehe Abbildung 4.

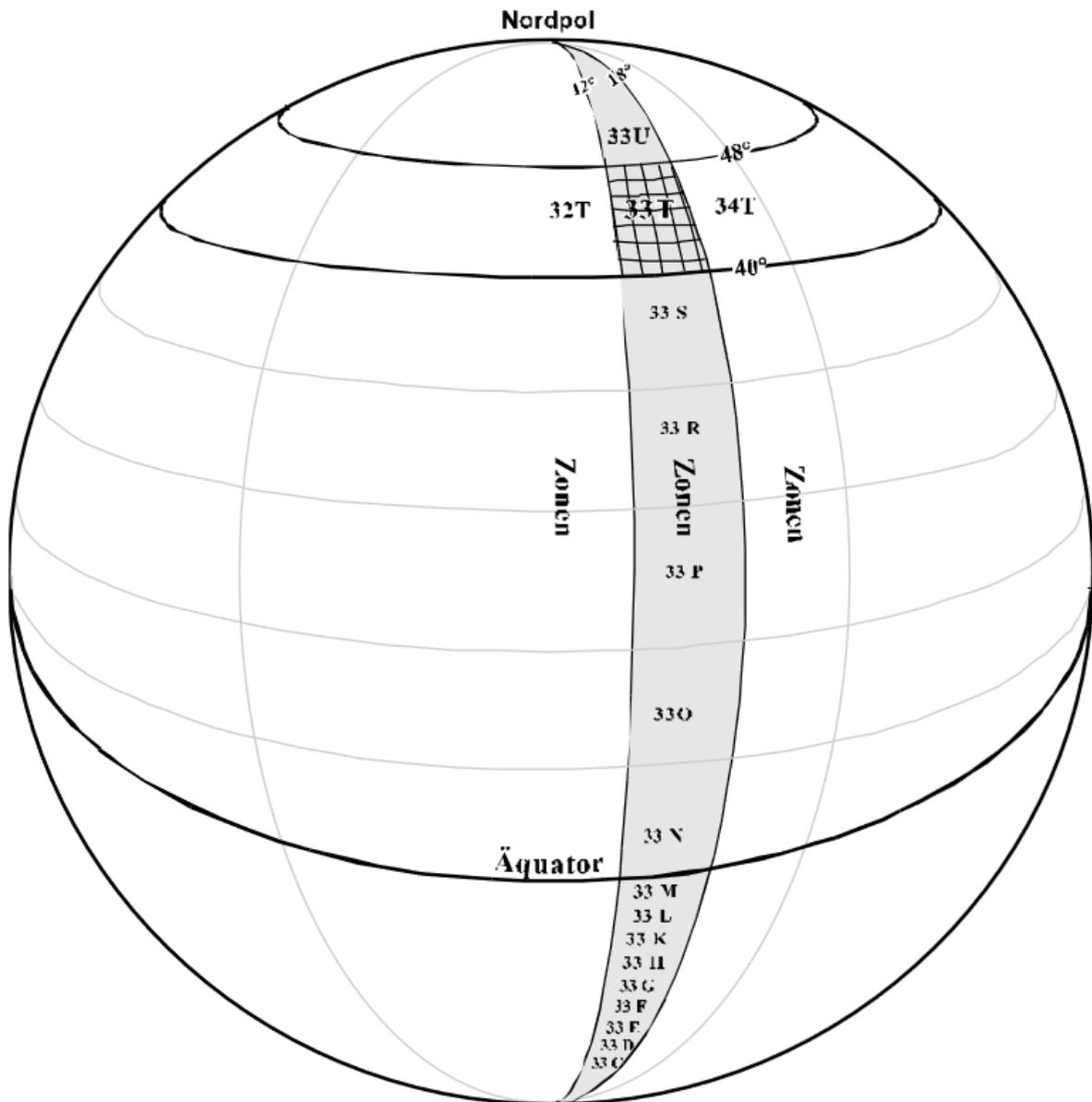


Abbildung 4: UTM-Abbildung [BEV (2021)]

Um die Verzerrungen an den Rändern der Zonen gering zu halten, werden die mit der Gauß-Krüger Abbildung gewonnenen x und y-Koordinaten jeweils mit dem Faktor 0,9996 multipliziert und als Grid Northing und Easting bezeichnet:

$$\text{Grid Northing: } N = 0,9996 * x \quad (3.1)$$

$$\text{Grid Easting: } E = 0,9996 * y \quad (3.2)$$

Durch die Skalierung geht die längentreue Abbildung entlang des Zentralmeridians verloren, jedoch findet man diese etwa 180 km östlich und westlich in parallelen Kurven zum Zentralmeridian. [BEV (2021)]

Im UTM-System wird das negative Vorzeichen vermieden, indem der konstante Wert von 10 000 000 m zu den N-Koordinaten der Südhalbkugel gezählt wird, zu den E-Koordinaten

(beider Hemisphären) wird der Wert 500 000 m addiert. Um diese Koordinaten von den zuvor genannten Northing und Easting – Koordinaten zu unterscheiden wird der Ausdruck „False“ ergänzt. Somit ergibt sich:

$$\text{False Northing:} \quad \text{FN} = \text{N} + 10\,000\,000 \text{ m (nur auf der Südhalbkugel)} \quad (3.3)$$

$$\text{False Easting:} \quad \text{FE} = \text{E} + 500\,000 \text{ m} \quad (3.4)$$

3.4 Lokale Systeme

Lokale Koordinatensysteme finden mit Vorteil in räumlich begrenzten Bereichen Verwendung. In diesen lokalen Systemen kann auf die Relativlage von Punkten fokussiert werden, ohne einen Bezug zu einem übergeordneten Koordinatensystem herzustellen. Als lokale Systemkoordinaten fungieren meist ebene Projektionskoordinaten.

Im Fall dieser Arbeit werden als lokale Koordinaten Gauß-Krüger (GK) Koordinaten verwendet. Bei der GK-Projektion werden Koordinaten ausgehend von einem Referenzellipsoid auf einen umschließenden Zylinder projiziert. Dieser Zylinder deckt sich mit dem Referenzellipsoid auf dessen Berührmeridian. Um den Berührmeridian wird in einem 3° breiten Streifen die Projektion angewandt. Um Punkte außerhalb dieses Streifens abzubilden, werden in 3° Abständen weitere Zylinder um das Referenzellipsoid gelegt. Die GK-Projektion ist der UTM-Projektion sehr ähnlich, mit dem Unterschied, dass die Streifenbreite nur 3° beträgt und die Koordinaten mit keinem Faktor multipliziert werden.

3.5 Fahrzeug spezifisches System (Bodyframe)

Im Unterschied zu anderen Koordinatensystemen orientiert sich der Bodyframe zur Gänze an dem betrachteten Objekt und macht Bewegungen und Rotationen mit. Daher finden Bodyframes häufig Anwendung bei beweglichen Objekten wie zum Beispiel Fahrzeugen.

Die Koordinatenachsen werden meist parallel zu den Achsen des Objekts ausgerichtet und der Ursprung befindet sich im oder in der Nähe des Objekts. Dies kann auch der Referenzpunkt eines mit dem Fahrzeug fix verbundenen Sensors sein. Der Ursprung bewegt sich also mit dem Objekt mit und die Koordinatenachsen rotieren wie das Objekt. Somit kann das Objekt seine Position und Ausrichtung ändern und die Koordinaten starrer Objektpunkte behalten ihre Werte bei, siehe Abbildung 5.

Die Rotationswinkel Yaw, Roll und Pitch beschreiben die Verdrehung des Fahrzeugkoordinatensystems zum lokalen System.

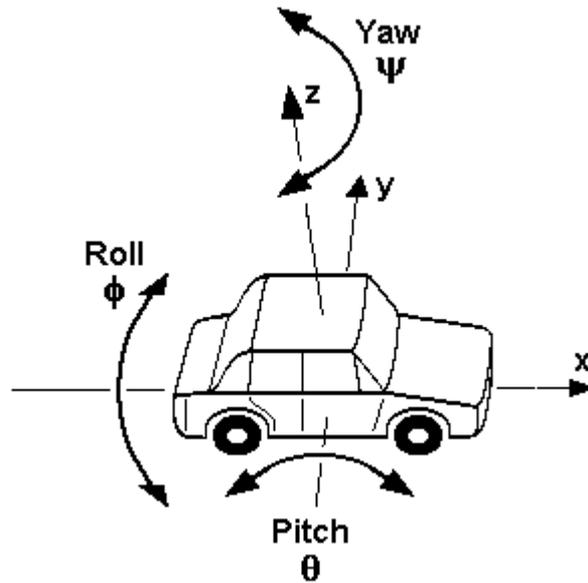


Abbildung 5: Bodyframe [Wikipedia (2021)]

3.6 Helmert Transformation

Die Helmert Transformation wird auch 7-Parametertransformation genannt, weil nur 7 Parameter notwendig sind, um Punktkoordinaten zwischen 2 kartesischen Koordinatensystemen transformieren zu können. Voraussetzung ist, dass alle Achsen demselben Maßstab unterliegen. Die Transformation wird über einen Verschiebvektor (Shift) und eine Rotationsmatrix beschrieben. Dabei werden folgende Parameter benötigt:

- $\delta x, \delta y, \delta z$ - die Shift-Parameter zwischen den Ursprüngen der Systeme
- $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ - die Rotations-Parameter um die Koordinatenachsen
- m - der Maßstabsfaktor

Die Transformation wird wie folgt formuliert:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \delta x \\ \delta y \\ \delta z \end{pmatrix} + (1 + m) \cdot R \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

- x', y', z' sind die Koordinaten im Zielsystem
- $\delta x, \delta y, \delta z$ repräsentieren den Differenzvektor zwischen den beiden Ursprüngen der Systeme, den Shift-Vektor
- m ist der Maßstab welcher üblicherweise in ppm (part per million) angegeben wird.
- R ist die Rotationsmatrix
- x, y, z sind die Koordinaten im Ausgangssystem

R setzt sich zusammen aus den Rotationsmatrizen um die 3 Koordinatenachsen R_z, R_y, R_x . Die Reihenfolge, mit der die einzelnen Rotationsmatrizen multipliziert werden, ist dabei essenziell, da die Matrixmultiplikation nicht kommutativ ist und deshalb bei einer anderen

Reihenfolge ein anderes Ergebnis entsteht. Per Definition wird zuerst die Rotation um die x-Achse, danach um die y-Achse und zuletzt um die z-Achse ausgeführt.

$$R = R_z R_y R_x = \begin{pmatrix} c\omega_y c\omega_z & s\omega_x s\omega_y c\omega_z + c\omega_x s\omega_z & -c\omega_x s\omega_y c\omega_z + s\omega_x s\omega_z \\ -c\omega_y s\omega_z & -s\omega_x s\omega_y s\omega_z + c\omega_x c\omega_z & c\omega_x s\omega_y s\omega_z + s\omega_x c\omega_z \\ s\omega_y & -s\omega_x c\omega_y & c\omega_x c\omega_y \end{pmatrix} \quad (3.6)$$

In Formel (3.6) ist der Sinus des Winkels mit „s“ abgekürzt und der Cosinus mit „c“. Die Rotationswinkel um die Achsen sind:

- ω_x , Rotationswinkel um die x-Achse
- ω_y , Rotationswinkel um die y-Achse
- ω_z , Rotationswinkel um die z-Achse

[Niemeier, W (2002):

3.7 Bestimmung der genäherten Transformationsparameter für die Helmert Transformation

Um Näherungswerte für die Transformationsparameter für die Helmert Transformation zu bestimmen sind mindestens 4 Identpunkte notwendig. Identpunkte sind Punkte deren Koordinaten im Start- und Zielsystem bekannt sind.

Diese 4 Identpunkte werden in die Formel (3.5) mit der Rotationsmatrix (3.6) eingesetzt, der Maßstab wird mit 1 angenommen, und ergeben ein Gleichungssystem mit 12 Gleichungen. Aus diesem Gleichungssystem werden die 12 unbekanntenen Transformationsparameter δx , δy , δz , und die 9 Unbekannten der Rotationsmatrix bestimmt. Diese gehen weiter als die Näherungswerte der Transformationsparameter in die Ausgleichung der Transformationsparameter ein.

3.8 Ausgleichung der genäherten Transformationsparameter für die Helmert Transformation

Um die genäherten Transformationsparameter auszugleichen wird ein vermittelnder Ausgleich der Transformationsparameter, durch folgende Schritte, ausgeführt:

1. Erstellen des Funktionalen Modells A

Hier werden die Näherungswerte der Rotationsmatrix (3.6) zusammen mit den Shift-Parametern und dem Maßstab in die Helmert Transformation (3.5) eingesetzt. Weiters werden die Koordinaten der Identpunkte in die Transformation eingesetzt und komplettieren somit die Gleichung. Da alle Komponenten der Gleichung bekannt sind, kann diese nach den Transformationsparametern ausgeglichen werden.

Jede Beobachtung (der Identpunkte) wird in die Helmert Transformation (3.5) eingesetzt und abgeleitet. Dies ergibt die A-Matrizen A_i . Die A_i aller Identpunkte werden zum funktionalen Modell A zusammengefasst.

2. Erstellen des Vektors der genäherten Transformationsparameter X_0

In X_0 werden δx , δy , δz , m , ωx , ωy und ωz angeführt.

3. Berechnen des genäherten Beobachtungsvektor l aus der Differenz von Koordinaten im Zielsystem minus der, mithilfe der genäherten Transformationsparameter und Koordinaten im Startsystem, gerechneten Koordinaten im Zielsystem.

$$l = L - L_0 \quad (3.7)$$

- L , gemessene Koordinaten der Identpunkte im Zielsystem
- L_0 , gerechnete Koordinaten der Identpunkte im Zielsystem, aus den Koordinaten im Startsystem mit den genäherten Transformationsparametern

4. Bestimmen der Normalgleichungsmatrix N mit der Gewichtsmatrix P gleich der Einheitsmatrix.

$$N = A^T P A \quad (3.8)$$

5. Die Unbekanntenzuschläge x der Transformationsparameter lassen sich bestimmen durch:

$$x = N^{-1} A^T P l \quad (3.9)$$

6. Berechnen der verbesserten Transformationsparameter

$$X_d = X_0 + x \quad (3.10)$$

4 Sensorik und Testmessungen

4.1 Aufgabestellung

Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung der Genauigkeit der absoluten Lage, welche durch ein 4 Antennen-GNSS-System ermittelt wurde. Das System ist auf einem Triebfahrzeug montiert und zeichnet während der Fahrt die Position des Fahrzeuges auf. Über die 4 Antennen kann die Lage und Richtung des Fahrzeuges bestimmt werden und daraus die Lage des Gleises. Weiters stehen terrestrisch vermessene Referenzdaten der Gleislage zur Verfügung, mit welchen die Gleislage aus dem 4 Antennen-GNSS-System verglichen werden kann. Das Ergebnis dieser Arbeit ist die Interpretation der Abstände zwischen der terrestrisch vermessenen Lage und der durch das 4 Antennen-System erhobenen Lage des Gleises.

4.2 Erforderliche Sensoren

Als Sensorik ist ein 4 Antennensystem mit GNSS-Antennen und einem GNSS-Empfänger sowie 4 Abstandssensoren auf dem Triebfahrzeug installiert. Das 4 Antennensystem bestimmt die Lage und Ausrichtung des Fahrzeuges in einem übergeordneten Koordinatensystem, in diesem Fall im ITRF2014. Die Abstandssensoren nehmen die relativen Abstände zwischen Fahrzeug und Schienen auf und sind über dem Bodyframe des Triebfahrzeuges mit dem 4 Antennensystem verbunden. Somit können die Lagepunkte der Schienen über deren relative Abstände zu den Abstandssensoren in den Bodyframe des Fahrzeuges transformiert werden und vom Bodyframe über die 4 GNSS-Antennen in den ITRF2014.

4.2.1 Positionierungs-System

Das 4 Antennensystem besteht aus dem JAVAD SIGMA GNSS-Empfänger und 4 JAVAD GrAnt G3T GNSS-Antennen [JAVAD (2021)]. Diese 4 Antennen sind in eine Hauptantenne und 3 Nebenantennen aufgeteilt. Die 4 Antennen empfangen Signale im Bereich von 1164 – 1254 MHz und 1551 – 1614 MHz und können somit GPS (L1, L2), GLONASS (L1, L2), Galileo (E1), BeiDou sowie WAAS und EGNOS empfangen.

Die Antennen sind derart am Dach des Triebfahrzeuges montiert, dass die Abschattung minimiert wird. Abbildung 6 zeigt die Anordnung der GNSS-Antennen auf dem Triebfahrzeug.

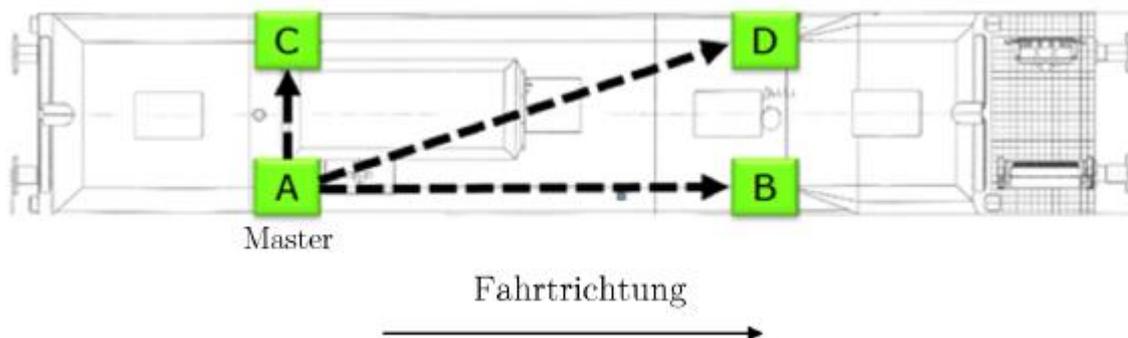


Abbildung 6: Anordnung der GNSS-Antennen [JAVAD (2021)].

4.2.2 Abstandssensoren

Zum Erfassen der Abstände zu den Schienen werden Gocator 2350 Profilsensoren [LMI (2021)] verwendet. Diese messen die Abstände zum Spurkranzanlagepunkt (siehe Abbildung 7) in Y-Richtung (quer zur Fahrtrichtung) und in Z-Richtung (normal auf XY-Ebene), im Fahrzeugkoordinatensystem. Die Abstandssensoren haben folgende Eigenschaften:

- Auflösung: 19 – 60 μm
- Wiederholbarkeit: 2 μm
- Messbereich: 30 – 70 cm
- Messgeschwindigkeit: 170 – 5000 Hz

4.3 Messaufbau

Die 4 GNSS-Antennen sind am Dach des Triebfahrzeuges, wie in Abbildung 6, gezeigt, montiert.

Die 4 Profilsensoren sind im Unterflurbereich am Wagenkasten unter den Positionen der GNSS-Antennen montiert [LMI (2021)] und messen zum Spurkranzanlagepunkt, siehe Abbildung 7. Dies ist jener Punkt, an dem der Spurkranz des Rades des Schienenfahrzeuges anliegt. Dieser Punkt liegt daher immer an der Schieneninnenseite.

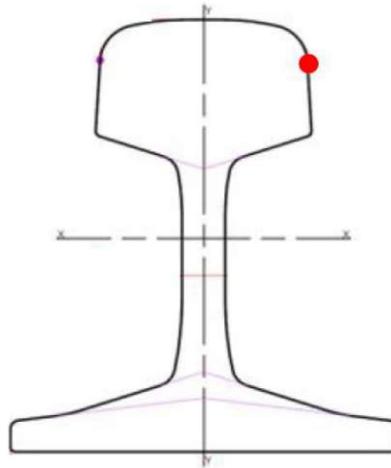


Abbildung 7: Spurkranzanlagepunkt

4.4 Teststrecke

Die Teststrecke ist ein Teil der Nordbahnstrecke und liegt nordöstlich von Wien, an der Grenze zur Slowakei. Die Teststrecke befindet sich zwischen Angern an der March und Dürnkrot, siehe Abbildung 8. Der Verlauf der Teststrecke wird in der Grafik durch eine rote Punktkette dargestellt und hat eine Länge von ca. 10 km.

Die Teststrecke wurde ebenfalls terrestrisch vermessen, um ihre absolute Lage zu bestimmen. Zusätzlich wurden Identpunkte gemessen, deren Koordinaten im lokalen System sowie im ITRF2014 bekannt sind. Die Identpunkte sind in der Abbildung 8 gelb eingetragen.

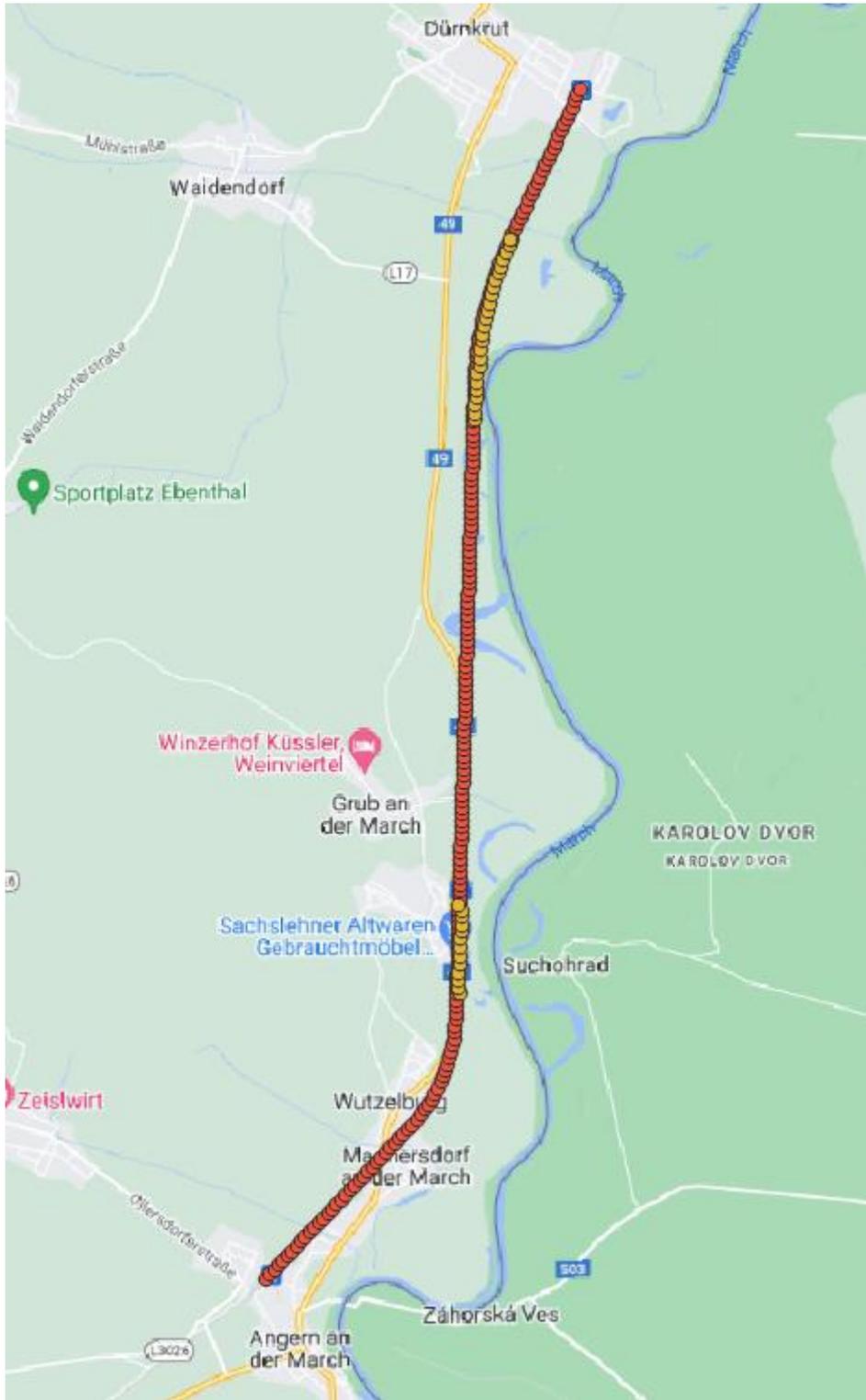


Abbildung 8: Verlauf der Messstrecke

4.5 Messfahrten

Die Teststrecke wurde im Zug der Messkampagne von 24. 07 bis 25.07. 2019, 16-mal befahren. Die Fahrzeiten und die Zeiten der längsten Stopps sind in Tabelle 2 und Tabelle 3 ersichtlich. Die Gesamtdauer der Fahrten betrug $1^{\text{h}}50^{\text{min}}37^{\text{sek}}$, bei einer Aufnahme­frequenz von 1 Hz, entspricht dies 6638 Messungen pro Antenne. Somit ergibt sich eine Gesamtanzahl der Antennenmessungen, von 26552 ($4 \cdot 6638$).

Die gesamte Messzeit während der Stopps beträgt 3:00:24. Bei der gewählten Aufnahme­frequenz von 1 Hz entspricht dies 10824 Messungen pro Antenne. Bei 4 Antennen ergibt dies 43296 Messungen.

Richtung	Startzeit UTC	Endzeit UTC	Datum
Angern -> Dürnkrot	09:23:50	09:31:03	24.07.2019
Dürnkrot -> Angern	09:49:23	09:56:22	24.07.2019
Angern -> Dürnkrot	11:38:14	11:45:17	24.07.2019
Dürnkrot -> Angern	12:42:05	12:49:30	24.07.2019
Angern -> Dürnkrot	13:08:05	13:14:46	24.07.2019
Angern -> Dürnkrot	14:30:16	14:37:58	24.07.2019
Dürnkrot -> Angern	15:19:12	15:25:46	24.07.2019
Angern -> Dürnkrot	07:23:26	07:29:59	25.07.2019
Dürnkrot -> Angern	07:42:51	07:49:50	25.07.2019
Angern -> Dürnkrot	08:05:56	08:12:56	25.07.2019
Dürnkrot -> Angern	08:22:25	08:29:29	25.07.2019
Angern -> Dürnkrot	08:39:53	08:46:39	25.07.2019
Dürnkrot -> Angern	09:08:28	09:15:05	25.07.2019
Angern -> Dürnkrot	09:21:23	09:28:10	25.07.2019
Dürnkrot -> Angern	09:36:44	09:43:22	25.07.2019
Angern -> Dürnkrot	09:51:44	09:58:20	25.07.2019

Tabelle 2: Zeiten der Messfahrten

Stopps	Startzeit UTC	Endzeit UTC	Datum
Stopp 1	10:20:55	11:34:06	24.07.2019
Stopp 2	11:47:57	12:28:01	24.07.2019
Stopp 3	13:17:43	14:24:49	24.07.2019

Tabelle 3: Zeiten der Stopps

5 Aufbereitung der GNSS-Daten

Die GNSS-Beobachtungsdaten werden vom JAVAD-Receiver in Form von RINEX-Files ausgegeben. Für jede Antenne wird ein separates File erzeugt. Um die Daten im Post-Processing mit Daten einer Referenzstation kombinieren zu können, werden für die Auswertung Messdaten der Referenzstation Mistelbach verwendet, da diese die nächste zur gemessenen Strecke ist. Der nähere Teil der Strecke hat einen Abstand von ca. 20 km zur Referenzstation, der entfernteste von ca. 26 km.

Für die Auswertung der GNSS-Daten wurde RTKlib verwendet. Weitere Berechnungen und Auswertungen werden mit Python durchgeführt.

5.1 RTKlib

RTKlib ist ein kostenloses Programm zur Auswertung von GNSS-Daten. Es stellt eine Vielzahl an Einstellungsmöglichkeiten zur Verfügung und ist daher im wissenschaftlichen Bereich weit verbreitet.

Die Eingangsdaten sind:

- GNSS-Beobachtungsdaten des GNSS-Receiver
- Beobachtungsdaten der EPOSA Referenzstation Mistelbach
- Korrekturdaten der Navigationsdaten

Die in den Folgekapiteln beschriebenen Einstellungen der Parameter wurden für die Auswertung getroffen. Die Parameterbezeichnungen werden in English angegeben, weil diese auch in RTKlib in English angeführt sind.

5.1.1 Positioning Mode

Beim Positioning Mode wird die Art der Positionsbestimmung gewählt. In diesem Fall wurde die Option „Kinematic“ für die Zeiträume gewählt, in denen sich das Triebfahrzeug bewegt hat und „Static“ für Zeiträume, in denen das Triebfahrzeug gestanden ist.

- Der Kinematic-Mode

Dies ist eine RTK-Auswerteoption im Postprocessing wie in Kapitel 2.4 RTK - Real Time Kinematic beschrieben, mit einem zusätzlichen erweiterten Kalman-Filter, welcher den Bewegungsfortschritt des Empfängers als Parameter schätzt.

- Der Static-Mode

ist ebenfalls eine Auswerteoption im Postprocessing mit einem erweiterten Kalman-Filter. Jedoch geht der Kalman-Filter diesmal von einem stationären Empfänger aus.

5.1.2 Frequencies

In dieser Einstellung wurde die Option „L1 + L2“ gewählt. Somit wurden die Beobachtungen auf den Frequenzen L1 und L2 für die Auswertung herangezogen.

5.1.3 Elevationmask

Bei Elevationmask kann der minimale Elevationswinkel angegeben werden, welchen Satelliten zum Empfänger aufweisen müssen. Wenn Satelliten einen kleineren Elevationswinkel zum Empfänger einnehmen, werden deren Signale nicht in die Positionsbestimmung einfließen. Dieser Winkel wird auch als Cut-Off Winkel bezeichnet, weil alle Signale von Satelliten mit tieferem Einfallswinkel nicht verwendet werden.

Tiefstehende Satelliten verbessern Positionierungskennwerte, wie die DOP-Werte. Jedoch ist ihr Signal anfälliger für Störungen wie z.B. durch Multipath-Effekte. Daher wird der Cut-Off Winkel variiert und der Einfluss auf die Genauigkeit untersucht.

Im Zuge dieser Arbeit wurde mit den Winkeln 10°, 20° und 30° ausgewertet, um den Einfluss des Cut-Offs auf die Genauigkeit der Positionsbestimmung zu ermitteln. Ein Genauigkeitsindikator ist ob die Mehrdeutigkeiten der Phasenlösung gelöst und fixiert wurden oder nicht. Punkte, bei deren Positionsberechnung die Phasenmehrdeutigkeiten gelöst werden konnten werden mit „fixed“ klassifiziert und Punkte bei denen dies nicht gelang, werden mit „float“ klassifiziert.

Es konnten nicht zu allen Zeitpunkten Positionslösungen erstellt werden, somit wurden einige Punkte verloren. Diese Punkte wurden mit „lost“ klassifiziert. In Tabelle 4 werden „fixed“, „float“ und „lost“ Punkte der 3 Cut-Offs angeführt.

Cut-Off Winkel [°]	fixed	float	lost
10	12569	12835	1148
20	14578	10254	1720
30	16484	7740	2328

Tabelle 4: Punkteanzahl der Cut-Offs der Fahrten

Hier lässt sich ein deutlicher Trend erkennen Je höher der Cut-Off, desto höher der Anteil an „fixed“ und „lost“ Punkten. Bei einem Cut-Off von 10° ist die Relation zwischen „fixed“ und „float“ Punkten fast 1 zu 1 und die „lost“ Punkte nehmen 4.3% ein.

Bei einem Cut-Off von 20° beträgt der Anteil an „fixed“ Punkte 54.9% und der Anteil an „float“ Punkten 38.6%, sprich der Anteil an „fixed“ Punkten ist deutlich höher als bei einem Cut-Off von 10°. Der Anteil an „lost“ Punkten (bei Cut-Off 20°) beträgt 6.5% und ist somit, im Vergleich zum Cut-Off von 10°, angestiegen.

Beim Cut-Off von 30° ist der Anteil an „fixed“ Punkten am höchsten und beträgt 62.1%, die „float“ Punkte erreichen 29.2% und die „lost“ Punkte 8.7%.

Somit kann zusammengefasst werden, je höher der Cut-Off (im Bereich zwischen 10° und 30°) umso höher der Anteil an „fixed“ Punkten aber auch an „lost“ Punkten. Der Grund dafür ist, dass Signale von tiefstehenden Satelliten einen längeren Weg durch die Atmosphäre beschreiten und dadurch Fehlereinflüsse größere Effekte auf die Signale haben. Dadurch können die Mehrdeutigkeiten schlechter bestimmt werden. Da „fixed“ Punkte eine höhere Genauigkeit aufweisen als „float“ Punkte kann mit steigendem Cut-Off eine

Genauigkeitssteigerung der Lagegenauigkeit erzielt werden, jedoch steigt auch die Anzahl der verlorenen Punkte.

Bei der statischen Positionsbestimmung zeigt sich ein ähnlicher Trend. Dennoch unterscheidet sich das Verhältnis zwischen „fixed“, „float“ und „lost“ Punkten in den verschiedenen Cut-Offs, siehe Tabelle 5. Bei einem Cut-Off von 10° sind 68.2% der Punkte „fixed“ und 31.6% „float“, die übrigen 0.2% sind „lost“ Punkte. Bei einem Cut-Off von 20° ist der Anteil der „fixed“ Punkte bei 96.8% und somit sehr deutlich höher als bei einem Cut-Off von 10°. Die mit „float“ klassifizierten Punkte haben einen Anteil von 3.0% und die „lost“ Punkte von 0.2%. Bei Cut-Off 30° verbessert sich der „fixed“ Punkte-Anteil auf 98.5%, der Anteil der „float“ Punkte ist verschwindend klein, und die „lost“ Punkte haben einen Anteil von 1.5%.

Cut-Off Winkel [°]	fixed	float	lost
10	29507	13701	88
20	41926	1282	88
30	42653	4	639

Tabelle 5: Punkteanzahl der Cut-Offs der Stopps

Somit lässt sich auch bei statischen Anwendungen die Genauigkeit, in Hinblick auf die Positionsqualität, mit einem entsprechenden Cut-Off verbessern. Jedoch muss beachtet werden, dass vor allem die vertikale Komponente der „fixed“ Punkte bei einem Cut-Off von 10° mit höherer Genauigkeit bestimmt werden kann als bei „fixed“ Punkte mit einem Cut-Off von 30°.

5.2 Weitere Aufbereitung der Daten (Parametervariation)

Um die Genauigkeit der Daten zu erhöhen, wurden mehrere Parametereinstellungen getestet und miteinander verglichen. Im Weiteren werden die Parameter beschrieben und deren Parameterwerte angegeben:

5.2.1 Positionsqualität

Da die einzelnen Punkte nach "fixed" und "float" Lösungen unterteilt werden können und eine Position des Triebfahrzeuges Punkte aller 4 Antennen benötigt, kann die Positionsbestimmung des Triebfahrzeuges mit "fixed" Punkten und "float" Punkten durchgeführt werden. Daher wurde weiters für die Positionsqualität des Triebfahrzeuges zwischen 3 Arten unterschieden:

- Alle Punkte "fixed"
Hier werden nur Positionen des Triebfahrzeugs ausgewertet, an denen alle 4 Punkte "fixed" sind.
- 3 Punkte "fixed"
Es werden alle Positionen des Triebfahrzeugs ausgewertet an denen mindestens 3 Punkte "fixed" Lösungen ausweisen.
- Alle Punkte
Es werden alle Positionen des Triebfahrzeugs ausgewertet, es wird nicht zwischen Punkten mit "fixed" und "float" Lösung unterschieden.

Der Cut-Off hat ebenfalls einen Einfluss auf die Positionsqualität. Im Folgenden werden die Punktzahlen der kinematischen Auswertung angeführt. Bei einem Cut-Off von 10° fallen in die Kategorie „Alle Punkte“ 5917 Punkte, in „3 Punkte fixed“ stehen 2089 Punkte zur Verfügung und in der Kategorie „Alle Punkte fixed“ befinden sich 797 Punkte.

Bei einem Cut-Off von 20° sind in „Alle Punkte“ nur mehr 5397 Punkte, also knapp 9% weniger als bei einem Cut-Off von 10°. In der Kategorie „3 Punkte fixed“ befinden sich bei einem Cut-Off von 20° 2712 Punkte, somit um knapp 30% mehr Punkte als in derselben Kategorie bei einem Cut-Off von 10°. Bei einem Cut-Off von 20° gehen 1250 Punkte, der Kategorie „alle Punkte fixed“ in die Auswertung ein, dies sind fast 60% mehr als in derselben Kategorie bei einem Cut-Off von 10°.

Bei einem Cut-Off von 30° umfasst die Kategorie „Alle Punkte“ 5465 Punkte, also ca. 8% weniger als bei einem Cut-Off von 10°. Die Kategorie „3 Punkte fixed“ enthält 3472 Punkte, somit ca. 66% mehr Punkte als in der Vergleichskategorie bei einem Cut-Off von 10°. Bei einem Cut-Off von 30° befinden sich in der Kategorie „Alle Punkte fixed“ 1561 Punkte also in etwa 96% mehr Punkte als in derselben Kategorie bei einem Cut-Off von 10°.

In Tabelle 6 sind die Anzahl der Punkte der jeweiligen Auswertevarianten angeführt. Die Auswertevarianten unterscheiden sich durch die 3 Kategorien der Positionsqualität und die 3 Cut-Offs.

Cut-Off	Alle Punkte fixed	3 Punkte fixed	Alle Punkte
10°	797	2089	5917
20°	1250	2712	5397
30°	1561	3472	5465

Tabelle 6: Punkteanzahl der Auswertevarianten

Hier lässt sich erkennen, dass in den Kategorien „Alle Punkte fixed“ und „3 Punkte fixed“ die Anzahl der Punkte mit höherem Cut-Off deutlich ansteigt. In der Kategorie „Alle Punkte“ lässt sich, bei steigendem Cut-Off, ein Abwärtstrend der Punktzahl erkennen. Dieser ist jedoch nicht einheitlich, da die Punktzahl von dem 10° Cut-Off mit 5917 Punkten, auf 5397 Punkte bei 20° abfällt, aber zum Cut-Off vom 30° wieder auf 5465 Punkte ansteigt.

Die 3 Kategorien der Cut-Offs verhalten sich ähnlich zueinander. In der Kategorie „Alle Punkte fixed“ befinden sich bei jedem Cut-Off die wenigsten Punkte, in der Kategorie „3 Punkte fixed“ deutlich mehr und die Kategorie „Alle Punkte“ beinhaltet die meisten Punkte.

5.2.2 Toleranz der inneren Geometrie der GNSS-Antennen

Als weiteren Parameter für die Genauigkeit der Antennenpositionen, können die relativen Abstände zwischen den Antennen herangezogen werden. Diese relativen Abstände lassen sich aus der terrestrischen Vermessung der GNSS-Antennen am Triebfahrzeug ableiten. Da die Vermessung mit einem Tachymeter durchgeführt wurde, ist die Genauigkeit der relativen Abstände im Bereich von wenigen mm.

Die über GNSS bestimmten Positionen der Antennen sollten dieselben relativen Abstände zueinander ausweisen. Da die Genauigkeit der GNSS-Messungen bestenfalls im wenige cm-Bereich liegt (bei kinematischen Anwendungen), werden die relativen Abstände aus den GNSS-Messungen Abweichungen zu den relativen Abständen der terrestrischen Messung aufweisen. Diese Abweichungen der relativen Abstände lassen sich als Qualitätskriterium der GNSS-Messung einführen und die Positionen des Triebfahrzeuges können nach den Abweichungen der relativen Abstände zwischen den Antennenpositionen unterteilt werden.

Der Wert der Toleranz definiert die maximale Abweichung zwischen den relativen Abständen aus terrestrischer und GNSS-Messung.

Es wurden folgende Werte in [mm] für die Toleranz angesetzt:

- 10
- 20
- 30
- 40
- 50
- 60
- 70
- 80
- 90
- 100
- 150
- 200
- 1000
- 10000
- 100000

Weitere Details sowie die Abbildung 14, welche die Punktzahl der verschiedenen Auswertevariationen zeigt, sind im Kapitel Punktzahl der Auswertevarianten 7.1.2 zu finden.

6 Transformationen – Zusammenführung verschiedener Koordinatensysteme

Da die Daten der Positionen der GNSS-Antennen, der Profilsensoren und der terrestrisch erhobenen Referenzdaten der Gleislage in verschiedenen Koordinatensystemen vorliegen, müssen diese in ein gemeinsames Koordinatensystem transformiert werden, um miteinander verglichen werden zu können. Als Ziel-Koordinatensystem wurde das lokale System (siehe: Kap 3.4) gewählt. Somit müssen die GNSS-Messungen der Antennenpositionen vom ITRF ins lokale System transformiert werden und die Daten der Profilsensoren vom Bodyframe ins lokale System.

Hierzu sind mehrere Prozessschritte notwendig, siehe Abbildung 9.

1. Im ersten Schritt werden aus den Identpunkten im ITRF und im lokalen System die Transformationsparameter vom ITRF ins lokale System bestimmt. Weitere Details werden in Kapitel 6.1 gezeigt.
2. Mit den Transformationsparametern vom ITRF ins lokale System werden die Antennenpositionen, welche im ITRF bekannt sind ins lokale System transformiert.
3. Weiters werden aus den Antennenpositionen im lokalen System und den Antennenpositionen im Bodyframe, die Transformationsparameter vom Bodyframe ins lokale System berechnet. Weitere Details sind im Kapitel 6.2 zu finden.
4. Im vierten Schritt werden die Gleispunkte vom Bodyframe, mit den Transformationsparametern, aus Schritt 3, ins lokale System transformiert.

Im lokalen System können die Gleispunkte mit den terrestrisch vermessenen Referenzpunkten verglichen werden. Diese Auswertungen sind in Kapitel 7 zu finden.

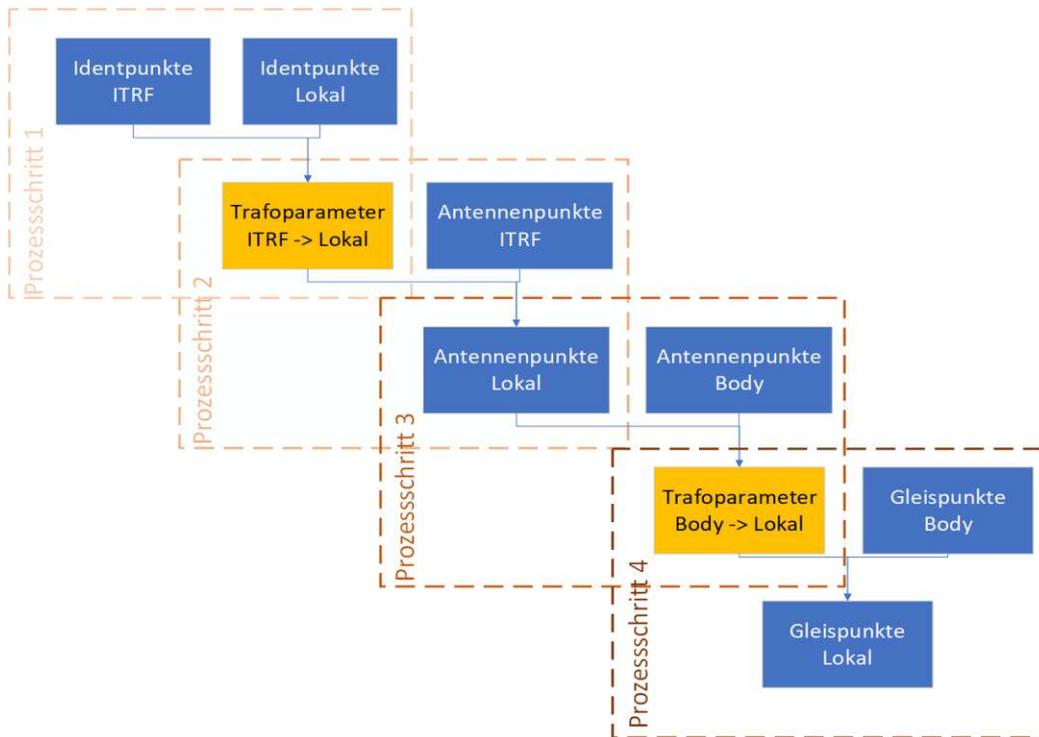


Abbildung 9: Prozess der Transformationen

6.1 Bestimmung der Transformationsparameter vom ITRF ins lokale System

Zur Bestimmung der Transformationsparameter wird ein 2-stufiges Verfahren angewandt. Im ersten Schritt werden 4 Identpunkte bestimmt. Dies sind Punkte deren Koordinaten in beiden Systemen bekannt sind. Mit Hilfe dieser 4 Identpunkte werden Näherungswerte der Transformationsparameter bestimmt. Danach gehen alle Identpunkte in die Ausgleichung der 7-Parameter-Transformation ein und die Näherungsparameter werden ausgeglichen.

Ausgehend von Formel (3.5) kann mit 4 Identpunkten ein Gleichungssystem mit 12 Gleichungen für die 3 Unbekannten δx , δy , δz und die 9 Elemente der Rotationsmatrix R aufgestellt werden. Die Shift-Parameter werden direkt ermittelt. Die Rotationen um die Achsen werden aus den Elementen der Rotationsmatrix R abgeleitet. Der Maßstab wird näherungsweise mit 1 angenommen.

Im zweiten Schritt gehen die ermittelten Näherungswerte und alle verfügbaren Identpunkte in die Ausgleichung der 7-Parameter-Transformation ein. Dies ist eine kleinste Quadrate Ausgleichung, welche das Ziel hat, die Summe der Quadrate der Fehler zu minimieren. Eine detaillierte Beschreibung ist in Kapitel 3.8 zu finden. Somit haben Fehler einzelner Punkte einen möglichst geringen Einfluss die ausgeglichenen Transformationsparameter, siehe Tabelle 7.

Transformationsparameter	Wert
Shift in X-Richtung	52513.6628 [m]
Shift in Y-Richtung	386645.7239 [m]
Shift in Z-Richtung	-6366161.1737 [m]
Maßstab	0.9999932927957565 []
Rotation um X-Achse	2.887215099201776 [rad]
Rotation um Y-Achse	2.454287389538021 [rad]
Rotation um Z-Achse	5.092085000653007 [rad]

Tabelle 7: Transformationsparameter vom ITRF ins lokale System

Für die Ermittlung der Rotationsparameter werden alle verfügbaren Identpunkte herangezogen und der Parametersatz wird für die gesamte Strecke verwendet. Die Aufteilung der Identpunkte entlang der Messstrecke kann Abbildung 10 entnommen werden. Die Achse der Messstrecke wird mit roten Punkten dargestellt und die Identpunkte in Gelb. Die Messstrecke befindet sich auf der Nordbahn zwischen Angern an der March (im Süden) und Dürnkrot (im Norden).

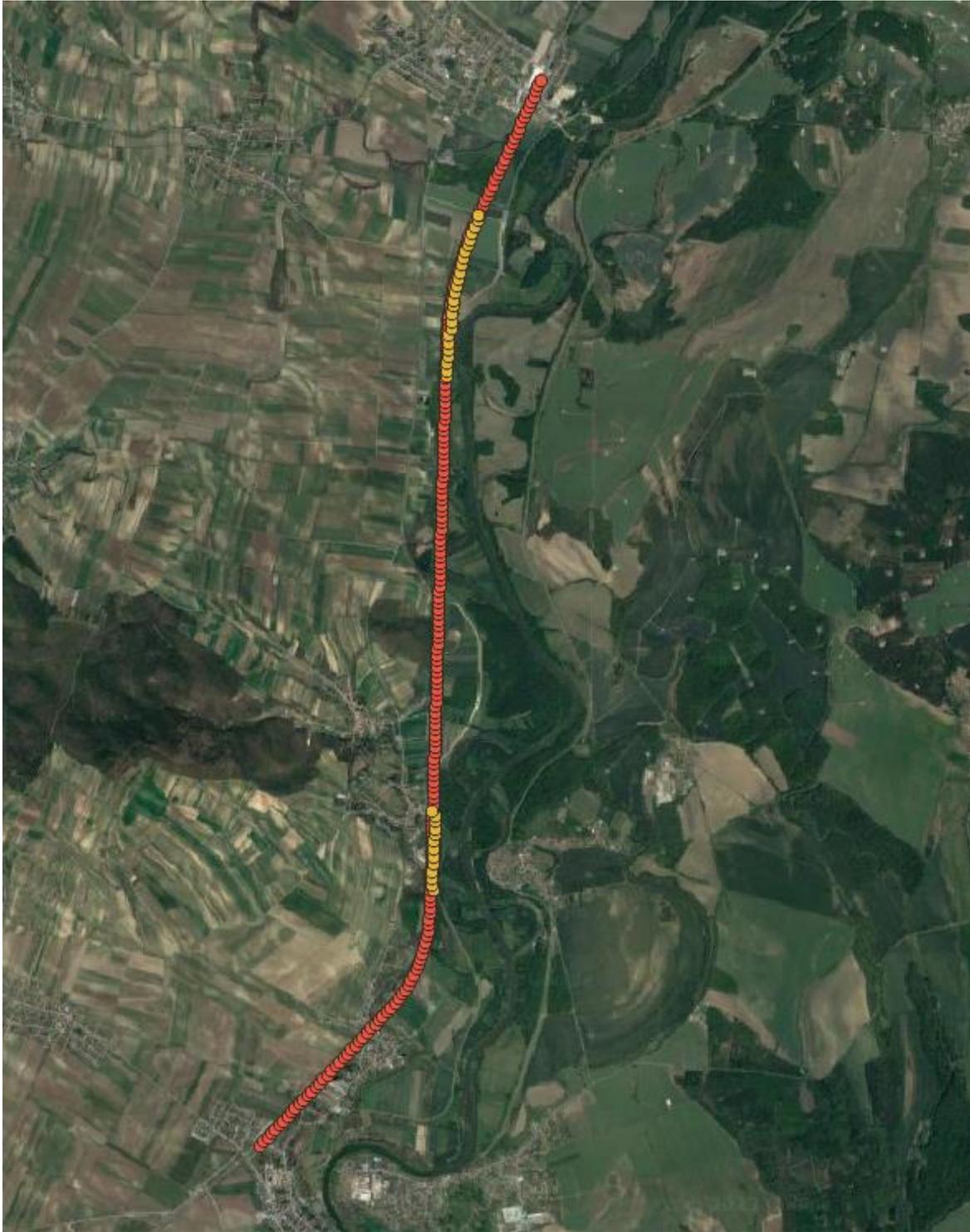


Abbildung 10: Streckenübersicht

6.2 Bestimmung der Transformationsparameter vom Bodyframe ins Lokale System

Mit den Antennenpositionen im lokalen System und den Antennenpositionen im Bodyframe, können für jeden Messzeitpunkt, mit den entsprechenden Antennenpositionen in beiden Systemen, die Transformationsparameter vom Bodyframe ins lokale System berechnet werden. Hierbei ist zu beachten, dass das Triebfahrzeug während der Fahrt über das Gleis, seine Position zu jedem Zeitpunkt verändert bzw. die Antennenpositionen zu unterschiedlichen Zeitpunkten unterschiedliche Positionen einnehmen. Daraus folgt, dass die Transformationsparameter vom Bodyframe ins lokale System für jeden Zeitpunkt neu bestimmt werden müssen und nur für den jeweiligen Punkt eingesetzt werden. Dieses Verfahren ist analog zu dem in Kapitel 6.1. Im ersten Schritt werden die genäherten Transformationsparameter über ein Gleichungssystem bestimmt, siehe Kapitel 3.7. und im zweiten Schritt werden diese ausgeglichen, siehe Kapitel 3.8.

7 Vergleich GNSS-Positionen mit der terrestrischen Messung

Aus der terrestrischen Referenzmessung sind Punkte der Gleisachsen bekannt. Diese sollen mit den Messpunkten der Profilsensoren verglichen werden. Die Profilsensoren messen den Abstand zum Spurkranzanlagepunkt, ein Punkt an der Innenseite der Schiene. Da die Profilsensoren den Spurkranzanlagepunkt zeitgleich an beiden Schienen messen, kann aus diesem Punktepaar, (aus den Messpunkten an der linken und der rechten Schiene) ein Achspunkt gerechnet werden. Dieser ist jeweils in orange in Abbildung 11 dargestellt.

Die aus den Spurkranzanlagepunkten gerechneten Achspunkte befinden sich jedoch nicht im selben Gleisprofil wie die Gleisachspunkte aus der terrestrischen Messung, violett in Abbildung 11 dargestellt. Daher wurden die Punkte der Referenzmessung mittels Splineinterpolation verbunden und in Abbildung 11 blau dargestellt. Anschließend wurde der Normalabstand (grün in Abbildung 11 darstellt) zwischen Gleisachsspline (blau) und Gleisachspunkt (orange) aus der GNSS-Messung als Abstand zwischen IST und SOLL eingeführt.

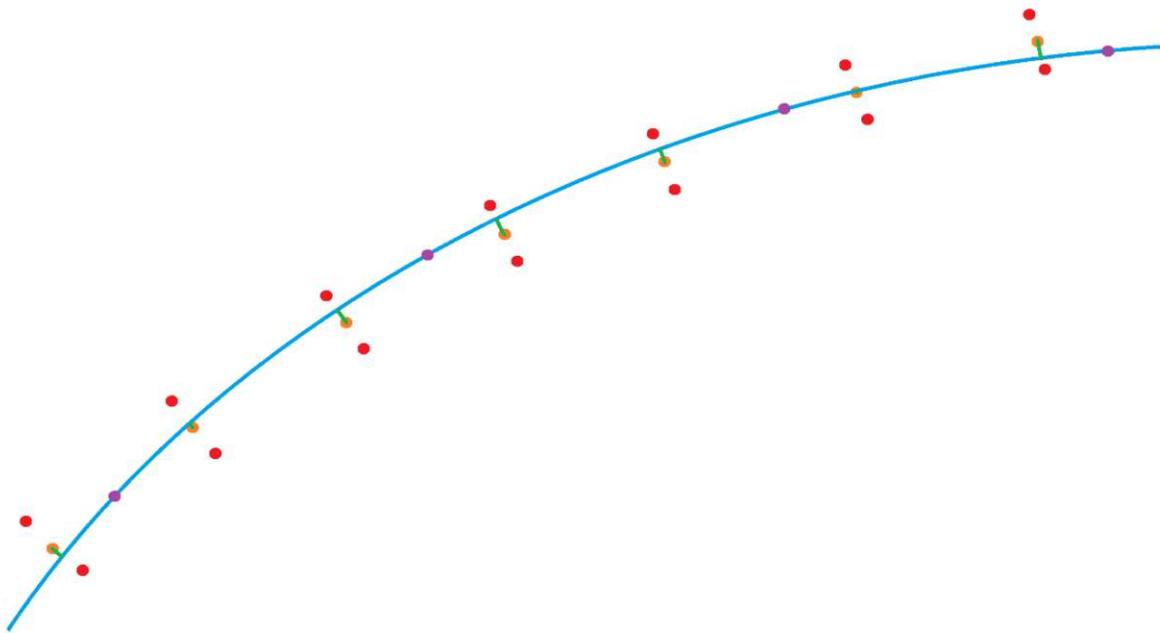


Abbildung 11: Vergleich Spurkranzanlagepunkt mit terrestrischer Messung

Aus diesen Normalabständen wird der Mittelwert berechnet und als Genauigkeitsangabe herangezogen. Um eine möglichst hohe Genauigkeit in der Auswertung zu erreichen, werden die GNSS-Messpunkte der 4 Antennen nach den Parametern Cut-Off, Positionsgenauigkeit und Toleranz gefiltert. Aus diesen gefilterten Daten werden die Normalabstände zur terrestrisch Gleisachse erhoben, und es wird deren Mittelwert bestimmt. Da die Parameter Cut-Off und Positionsqualität jeweils 3 Werte aufweisen und die Toleranz 15 Werte zulässt, ergeben sich 135 Varianten der Auswertung welche, in höherem Detailgrad, nicht

übersichtlich miteinander verglichen werden können. Daher wurde von jeder Auswertung der Mittelwert der Abweichungen bestimmt und alle Mittelwerte in einer Grafik dargestellt. Die Abbildung 12 und Abbildung 15 in den Kapiteln 7.1 und 7.2 zeigen entlang der vertikalen Achse die Genauigkeit und entlang der horizontalen Achse die Toleranzen der Auswertvarianten.

Punkte, welche aus Parametereinstellungen abgeleitet wurden, welche denselben Cut-Off und Positionsqualität haben werden mit einer Linie verbunden, um den Verlauf mit einer Änderung der Toleranz darzustellen.

Unterschiedliche Cut-Off Winkel werden durch unterschiedliche Farben gekennzeichnet und die verschiedenen Positionsqualitäten mit unterschiedlichen Linienarten. Die Linien werden wie folgt dargestellt:

- Cut-Offs
 - 10°: Blau
 - 20°: Grün
 - 30°: Rot
- Positionsqualität
 - Alle Punkte „fixed“: durchgezogene Linie
 - 3 Punkte „fixed“: strichlierte Linie
 - Alle Punkte: gepunktete Linie

Die Toleranzstufen stehen für folgende Toleranzen:

Toleranzstufe	Toleranz in [mm]
1	10
2	20
3	30
4	40
5	50
6	60
7	70
8	80
9	90
10	100
11	150
12	200
13	1000
14	10000
15	100000

Tabelle 8: Toleranzen

Um in weiterer Folge die unterschiedlichen Auswertungen leichter benennen zu können, werden die Parametervariationen aus Cut-Off und Positionsgenauigkeit, wie in Tabelle 9

ersichtlich, nummeriert und danach mit der Toleranzstufe ergänzt. So steht z.B. Auswertung 3 Toleranzstufe 10, für die Auswertung bei einem Cut-Off von 30° und einer Positionsqualität, bei welcher alle Punkte „fixed“ sind mit der Toleranzstufe 10 (100 mm).

Auswertungsnummer	Cut-Off	Positionsqualität
1	10°	Alle Punkte „fixed“
2	20°	Alle Punkte „fixed“
3	30°	Alle Punkte „fixed“
4	10°	3 Punkte „fixed“
5	20°	3 Punkte „fixed“
6	30°	3 Punkte „fixed“
7	10°	Alle Punkte
8	20°	Alle Punkte
9	30°	Alle Punkte

Tabelle 9: Auswertungsvarianten

Weiters wird die Auswertung in einen kinematischen und einen statischen Teil unterteilt. In der kinematischen Auswertung werden Fahrten ausgewertet und in der statischen Auswertung die 3 längsten Stopps.

7.1 Auswertung der Fahrten (kinematisch)

Als Fahrten wurden jene Zeiträume definiert, in welchen sich das Triebfahrzeug mehr als 4 Minuten bewegt hat. Diese Daten wurden zusammengefasst und ausgewertet. Abbildung 12 zeigt die verschiedenen Auswertungen, welche durch die Variation der Parameter Positionsgenauigkeit, Cut-Off und Toleranz entstanden sind.

Die Anzahl der Punkte ist für praktische Anwendungen von großer Wichtigkeit. Wenn die Filterparameter der Auswertung sehr streng angesetzt werden und z.B. niedrige Toleranzen verwendet werden, ist der Mittelwert der Abweichungen geringer als bei größeren Toleranzen. Wenn dadurch allerdings nur noch eine unzureichende Anzahl an Punkten verwendet wird, kann die Geometrie des Gleises nicht ausreichend bestimmt werden. In diesem Fall haben die Messpunkte zwar eine hohe Genauigkeit, sind aber für den Anwendungsfall nicht ausreichend und daher ist die Auswertung nicht zu verwenden. Deshalb kann es notwendig sein eine Auswertevariante zu wählen, deren Genauigkeit zwar schlechter als die bestmögliche ist, jedoch ausreichend Punkte liefert. Daher ist eine Gegenüberstellung der Genauigkeiten (siehe Abbildung 12) und der Punktzahl (siehe Abbildung 14), der Auswertungen notwendig, um die bestmögliche Kombination der Parameter für individuelle Anwendungsfälle zu bestimmen.

Weiters wird die Genauigkeit der Auswertevarianten in 3 Bereiche unterteilt:

1. Bereich: Toleranzstufe 1 bis 4
2. Bereich: Toleranzstufe 4 bis 10
3. Bereich: Toleranzstufe 10 bis 15

Diese Einteilung wurde aufgrund der Verläufe der Genauigkeit der Auswertevarianten in Abbildung 12 getroffen. Von Toleranzstufe 1 bis 4 liegen die Genauigkeiten der Auswertevarianten eng beieinander, von Toleranzstufe 4 bis 10 fächern sie sich auf und ab Stufe 10 separieren sie sich deutlich voneinander. Der Grund dafür ist die Änderung der Schrittweite zwischen den Toleranzstufen ab Toleranzstufe 10, siehe Tabelle 8. Aus Tabelle 10 lassen sich die Genauigkeit und Standardabweichung der 3 Bereiche entnehmen.

Bereich	Toleranzstufen	Genauigkeit [m]	Standardabweichung [m]
1.	1 bis 4	0.015 - 0.030	0.053 - 0.087
2.	4 bis 10	0.017 - 0.102	0.066 - 0.767
3.	10 bis 15	0.025 - 0.650	0.077 - 1.467

Tabelle 10: Genauigkeiten und Standardabweichung der Bereiche

Weiters wird betrachtet und gezeigt, welcher der Filterparameter maßgebend die Genauigkeit beeinflusst. Im Anschluss daran wird die Punktzahl der Auswertevarianten in den 3 Bereichen beleuchtet.

7.1.1 Genauigkeit der Auswertvarianten

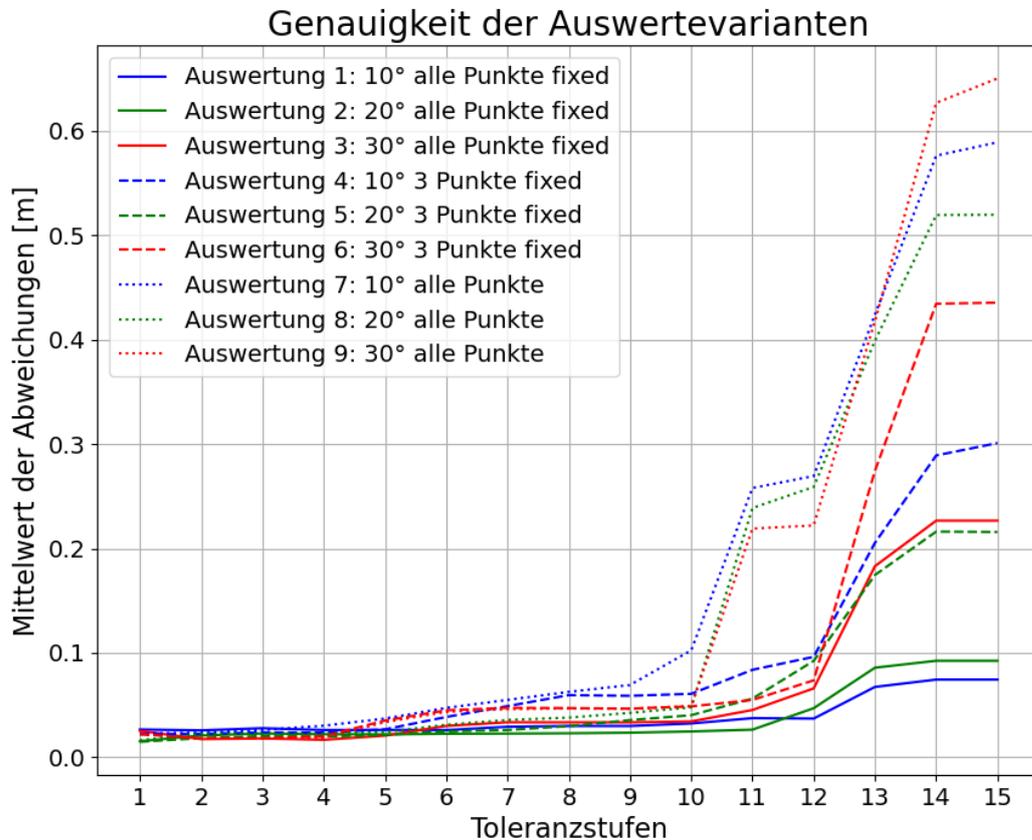


Abbildung 12: Genauigkeit der Auswertvarianten

In Abbildung 12 ist zu erkennen, dass Auswertungen welche ausschließlich „fixed“ Punkte verwenden (durchgezogene Linien) bessere Genauigkeiten erreichen, als jene die auch 3 „fixed“ und einen „float“ Punkte oder generell alle Punkte verwenden.

Ab der 10. Toleranzstufe (3. Bereich) gehen die Genauigkeiten der Auswertungen deutlicher auseinander. Dies liegt vor allem an den größeren Schrittweiten der Toleranzen. Die Stufen 1 bis 10 haben Schrittweiten von 10 mm, ab der 10. Stufe wird die Schrittweite deutlich erhöht, um einen besseren Einblick zu bekommen, wie sich die Genauigkeiten am Weg bis zur höchsten Toleranzstufe entwickeln. Die höchste Toleranzstufe ist so gewählt, dass alle Punkte in die Auswertung einfließen. Hier ist zu erkennen, dass die Positionsqualität die Genauigkeit maßgebend beeinflusst. Auswertungen, welche alle Punkte „fixed“ voraussetzen, haben bessere Genauigkeiten, als jene die Positionen auch mit nur 3 „fixed“ Punkten verwenden. Auswertungen, welche die Positionsqualität nicht berücksichtigen und alle Punkte verwenden, erreichen die schlechtesten Genauigkeiten.

Dabei verdeutlicht die letzte Toleranzstufe auch, welche Genauigkeit erreicht wird, wenn die innere Geometrie außer Acht gelassen wird, oder vice versa, wie sich die Genauigkeit

verbessern lässt, wenn die innere Geometrie zwischen den GNSS-Messpunkten berücksichtigt wird.

Allerdings ist für die Feststellung der Gleislage eine Genauigkeit besser 0.1 m wichtig, weshalb die in Abbildung 12 dargestellte Auswertung detaillierter im Genauigkeitsbereich von 0 bis 0.1 m in Abbildung 13 gezeigt wird.

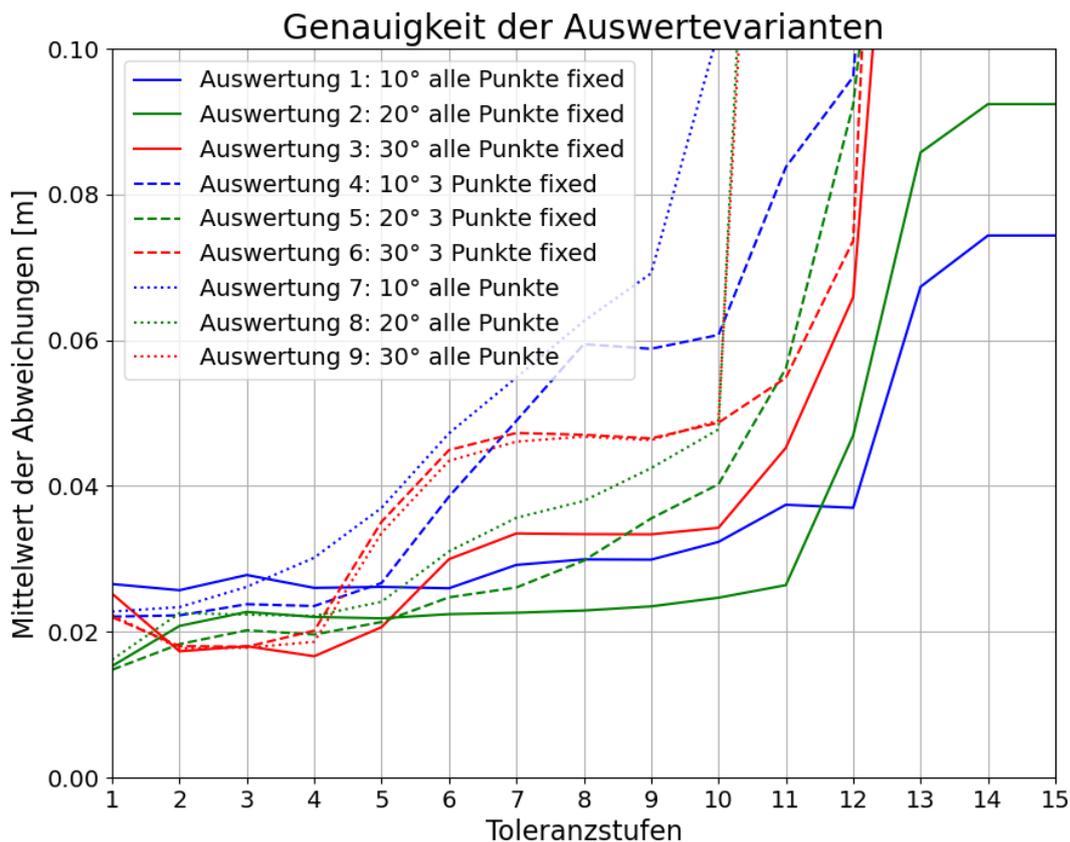


Abbildung 13: Auswertung der kinem. Messung im Genauigkeitsbereich von 0 bis 0,1 m

7.1.1.1 Maßgebende Parameter in den 3 Bereichen

Es lässt sich erkennen, dass im 1. Bereich eher der Cut-Off maßgebend die Genauigkeit beeinflusst. Auswertungen mit einem Cut-Off von 30° liefern eine bessere Genauigkeit als Auswertungen mit 20°. Auswertungen mit 10° haben die schlechteste Genauigkeit. Ein Grund für die schlechtere Genauigkeit der Auswertungen mit geringerem Cut-Off, könnte die höhere Fehleranfälligkeit der Signale tiefstehender Satelliten sein.

Im 2. Bereich ist eher die Positionsqualität der genauigkeitsbestimmende Parameter. Hier liefern die Auswertungen, bei denen alle Punkte fixed sind, größtenteils bessere Ergebnisse. Bei den verbleibenden 6 Auswertungen scheint der Cut-Off einen größeren Einfluss zu haben.

Im 3. Bereich hat, wie zuvor beschrieben, die Positionsqualität den größten Einfluss auf die Genauigkeit. Auswertungen, welche nur „fixed“ Punkte verwenden, zeigen die beste

Genauigkeit. Im Vergleich dazu haben Auswertungen, welche alle Punkte verwenden die schlechteste Genauigkeit.

7.1.1.2 Einfluss des Cut-Offs

Der Einfluss des Cut-Offs erstreckt sich nicht über die gesamte Genauigkeitsspanne der Auswertungen, ist aber dennoch deutlich zu erkennen. Im ersten Bereich von Toleranzstufe 1 bis 4 (Abbildung 13) ist die Genauigkeit tendenziell bei höheren Cut-Off höher. Eine geringere Genauigkeit weisen die Auswertungen mit einem Cut-Off von 10° auf. Die Auswertungen mit einem Cut-Off von 20° liegen eher im Mittelfeld der Genauigkeitsspannweite. Die Auswertungen mit einem Cut-Off von 30° erzielen die beste Genauigkeit. Im zweiten Bereich zwischen Toleranzstufe 4 und 10 (Abbildung 13) verschwimmen die Auswertvarianten bezogen auf den Cut-Off. Die geringste Genauigkeit haben 2 der 3 Auswertvarianten mit einem Cut-Off von 10° (Auswertung 4 und 7). Die restlichen Auswertungen sind bezogen auf den Cut-Off durchmischt und es lässt sich keine Tendenz erkennen. Im dritten Bereich (Abbildung 12) von Toleranzstufe 10 bis 15 dominiert die Positionsqualität die Genauigkeit und die verschiedenen Cut-Offs sind durchmischt. Generell muss gesagt werden, dass sich die hier getroffenen Aussagen auf die Lagegenauigkeit beziehen. Im Falle der Betrachtung der Höhengenaugigkeit wäre natürlich ein geringerer Cut-Off Winkel von Vorteil.

7.1.1.3 Einfluss der Positionsqualität

Die Positionsqualität spielt im ersten Bereich, Toleranzstufe 1 bis 4 (Abbildung 13), eine untergeordnete Rolle. Hier dominiert der Cut-Off die Genauigkeit. Im zweiten Bereich von Toleranzstufe 4 bis 10 (Abbildung 13), lässt sich erkennen, dass wenn alle Punkte „fixed“ sind, die beste Genauigkeit erreicht wird. Bei den übrigen Auswertungen scheint der Cut-Off der genauigkeitsbestimmende Parameter zu sein. Im dritten Bereich von Toleranzstufe 10 bis 15 (Abbildung 12) teilt sich die Genauigkeit der Auswertvarianten nach der Positionsqualität auf.

7.1.1.4 Einfluss der inneren Geometrie (Toleranzstufen)

Die innere Geometrie beeinflusst die Genauigkeit in höchstem Maße, dies verdeutlicht der Verlauf und Unterschied der Genauigkeit von Toleranzstufe 1 bis 15 (Abbildung 12). Gerade für den Fall, dass die Positionsqualität „alle Punkte“ zulässt, kann die Genauigkeit vom Bereich von 0.5 bis 0.7 m in den Bereich von 0.015 bis 0.030 m verbessert werden.

Auswertvarianten der Kategorien „3 Punkte fixed“ und „Alle Punkte fixed“ können ebenfalls auf 10 bis 20 % ihrer ursprünglichen Genauigkeit (Genauigkeit der Toleranzstufe 15) verbessert werden, indem Punkte, welche die Vorgabeparameter der inneren Geometrie der Toleranzstufe nicht erreichen, herausgefiltert werden.

7.1.2 Punkteanzahl der Auswertvarianten

Wie zuvor angemerkt spielt auch die Anzahl der Punkte, welche in die Auswertung einfließen, für praktische Anwendungen, eine große Rolle. Die Punkteanzahl der verschiedenen Auswertvarianten wird in Abbildung 14, dargestellt.

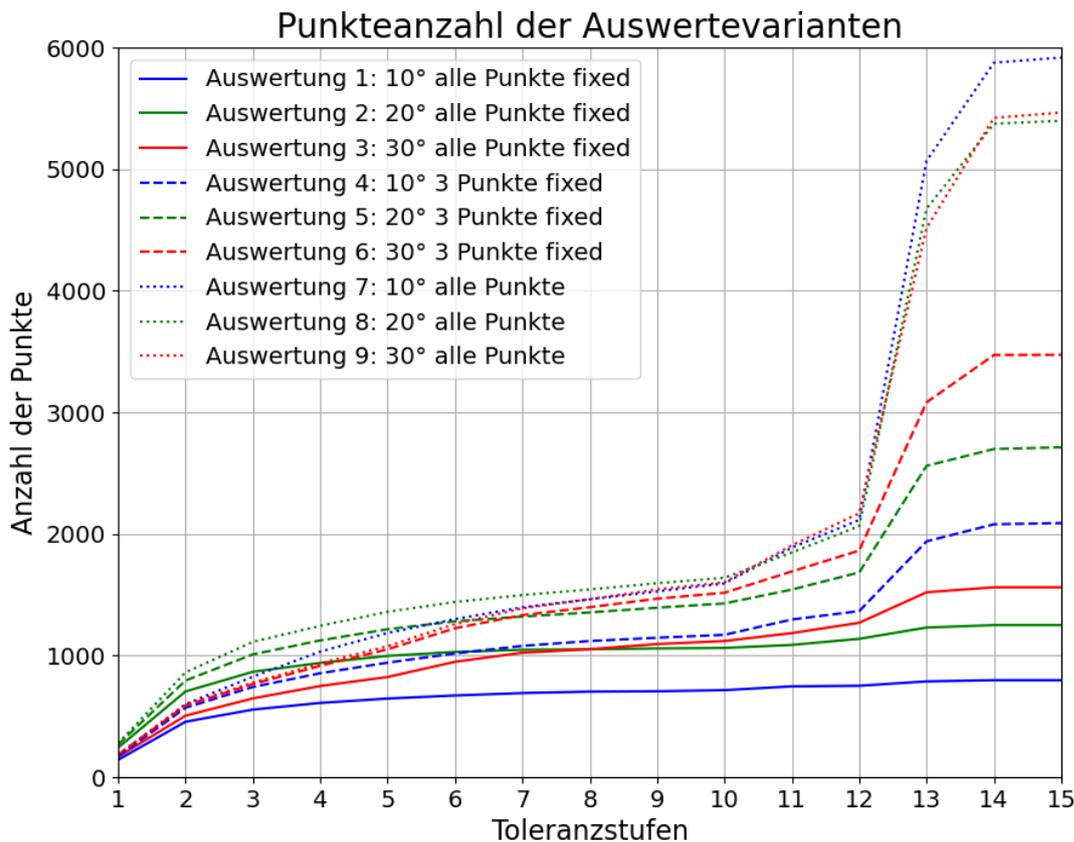


Abbildung 14: Punkteanzahl der Auswertevarianten

Generell kann der Abbildung 14 entnommen werden, dass Auswertevarianten, welche mit „strengeren“ Parametern, wie z.B. kleineren Toleranzen durchgeführt wurden, weniger Punkte zu Verfügung stehen als Auswertevarianten mit „gelockerten“ Parametern. Zusammen mit der Tendenz, dass Auswertungen mit „strengeren“ Parametern bessere Genauigkeiten liefern, könnte davon ausgegangen werden, dass, je weniger Punkte in die Auswertung eingehen, die Genauigkeit besser wird. Grob gesehen ist diese Tendenz je weniger Punkte desto besser die Genauigkeit gegeben, jedoch trifft sie in einigen Fällen nicht zu wie z.B. im Vergleich zwischen der Auswertung 3 und Auswertung 5 (Parameter siehe Tabelle 9, oder Abbildung 14) bei der 15. Toleranzstufe. Hier liegen die Mittelwerte der Abweichungen nahe zusammen, jedoch die Anzahl der Punkte bei Auswertung 3 beträgt 1561 und bei Auswertung 5 2712.

7.1.2.1 Maßgebende Parameter in den 3 Bereichen

Im ersten Bereich, zwischen Toleranzstufe 1 und 4, erreichen Auswertungen mit einem Cut-Off von 20° die höchsten Punktzahlen. Die übrigen Varianten teilen sich eher nach der Positionsqualität auf. Wobei naturgemäß „Alle Punkte fixed“ die wenigsten Punkte zur Verfügung stellt. „3 Punkte fixed“ stellt die mittlere Gruppe dar und „Alle Punkte“ enthält die meisten Punkte. Im zweiten Bereich wird von Toleranzstufe 4 beginnend bis Toleranzstufe 10 immer deutlicher, dass die Positionsqualität, nach der inneren Geometrie der Antennen, der

entscheidende Parameter für die Anzahl der Punkte darstellt. Im Bereich 3, von Toleranzstufe 10 bis 15, ist die Aufteilung der Auswertevarianten nach ihrer Positionsqualität sehr deutlich zu erkennen. Auswertungen, welche alle Punkte verwenden, haben die höchste Punkteanzahl. Jene Varianten die 3 Punkte „fixed“ fordern, erreichen Punktzahlen im Mittelfeld. Auswertevarianten, welche alle Punkte „fixed“ voraussetzen, haben die geringsten Punktzahlen.

7.1.2.2 Einfluss des Cut-Offs

Der Cut-Off zeigt im ersten Bereich von Toleranzstufe 1 bis 4 den größten Einfluss auf die Punkteanzahl, hier hat der Cut-Off von 20° die meisten Punkte und die Cut-Offs mit 10° und 30° liegen dahinter etwa gleich auf. Im zweiten Bereich wird der Einfluss des Cut-Offs wesentlich geringer und ist im dritten Bereich nicht zu erkennen.

7.1.2.3 Einfluss der Positionsqualität

Die Positionsqualität stellt im ersten Bereich noch eine untergeordnete Rolle dar, im zweiten Bereich wächst der Einfluss von Toleranzstufe 4 bis 10 stetig an und ist im dritten Bereich sehr deutlich zu erkennen.

7.1.2.4 Einfluss der inneren Geometrie (Toleranzstufen)

Die innere Geometrie, welche in die 15 Toleranzstufen unterteilt ist, zeigt den größten Einfluss bei Auswertevarianten, welche die niedrigste Positionsqualität („Alle Punkte“) verwenden. Da hier durch die Toleranzstufen der inneren Geometrie die meisten Punkte herausgefiltert werden und nicht in die Auswertung eingehen. Bei den Auswertevarianten mit der Positionsqualität „3 Punkte fixed“ ist der Einfluss schwächer, aber noch deutlich vorhanden. Bei den Auswertevarianten der Positionsqualität „Alle Punkte fixed“, ist der Einfluss am geringsten.

7.2 Auswertung der Stopps (statisch)

Als Stopps wurden die 3 längsten Zeiträume definiert, in welchen sich das Triebfahrzeug nicht bewegt hat (siehe Tabelle 3). Diese Daten wurden zusammengefasst und ausgewertet. Abbildung 15 zeigt die verschiedenen Auswertungen, welche durch die Variation der Parameter Positionsgenauigkeit, Cut-Off und Toleranz entstanden sind. Da die Toleranz der inneren Geometrie ab der Toleranzstufe 4 keinen erkennbaren Unterschied zeigt, wurden die Toleranzstufen 5 bis 14 entfernt. Die Toleranzstufe 15 wurde beibehalten, sie zeigt die Genauigkeit, wenn die innere Geometrie zwischen den Antennen nicht betrachtet wird. Generell scheint der Cut-Off den größten Einfluss auf die Genauigkeit zu haben, wie in Kapitel 7.2.1 gezeigt wird.

Der marginale Unterschied zwischen Toleranzstufe 4 und 15 wird auch bei der Punkteanzahl, welche in die Auswertungen eingeht, deutlich, siehe Abbildung 19. Generell hat bei statischen Anwendungen die Punkteanzahl eine untergeordnete Rolle, solange Punkte mit ausreichender Genauigkeit vorhanden sind.

7.2.1 Genauigkeit der Auswertevarianten

Die Genauigkeit der Gesamtauswertung aller Stopps liefert ein unerwartetes Bild, siehe Abbildung 15. Die Genauigkeit der meisten Auswertevarianten nehmen bei der Toleranzstufe 1 deutlich schlechtere Werte an als bei den darauffolgenden. Dies scheint ungewöhnlich, aufgrund der bisherigen Auswertungen im kinematischen Bereich. Ebenso erscheint die Genauigkeit der Toleranzstufen 2 bis 15 für eine statische Anwendung ungewöhnlich schlecht zu sein. Deshalb wurden die 3 Stopps zur Analyse einzeln betrachtet.

Stopps Gesamt Genauigkeit der Auswertevarianten

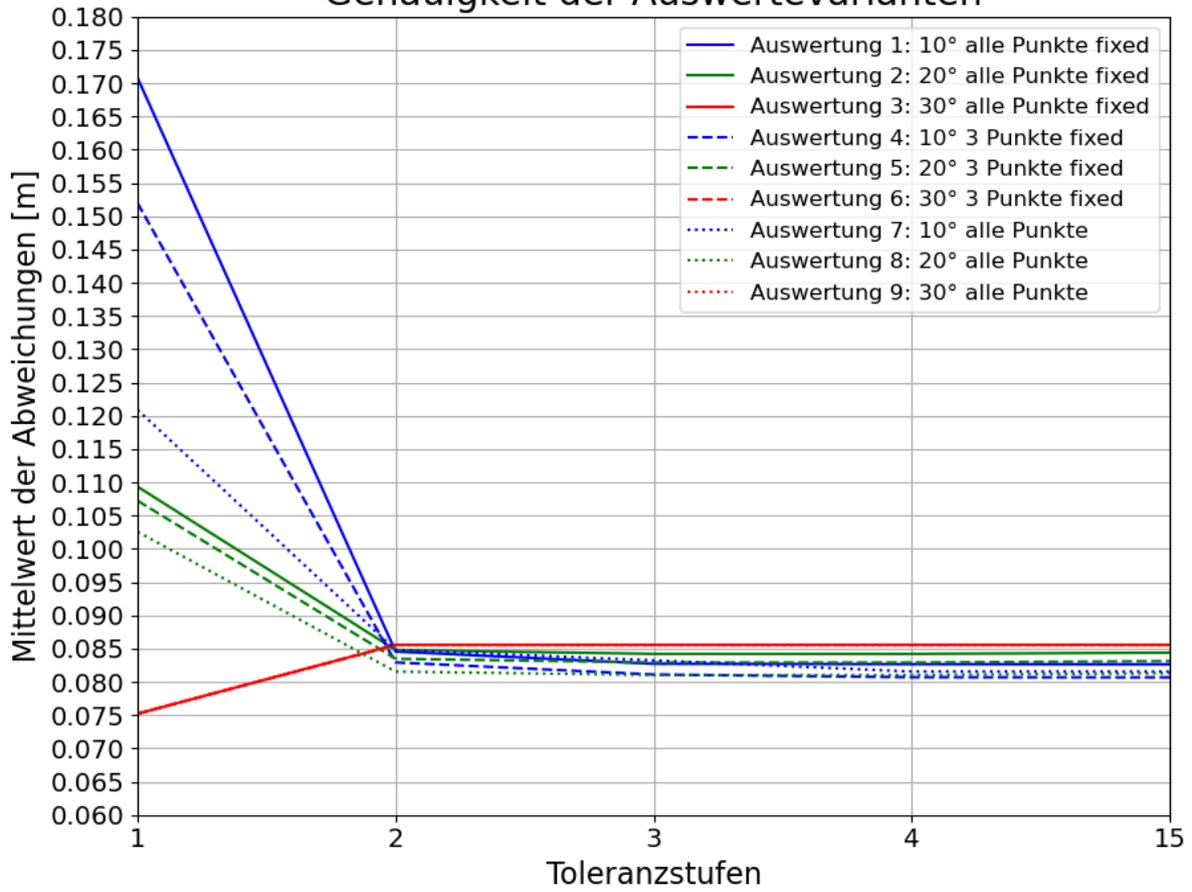


Abbildung 15: Genauigkeit Stopps gesamt

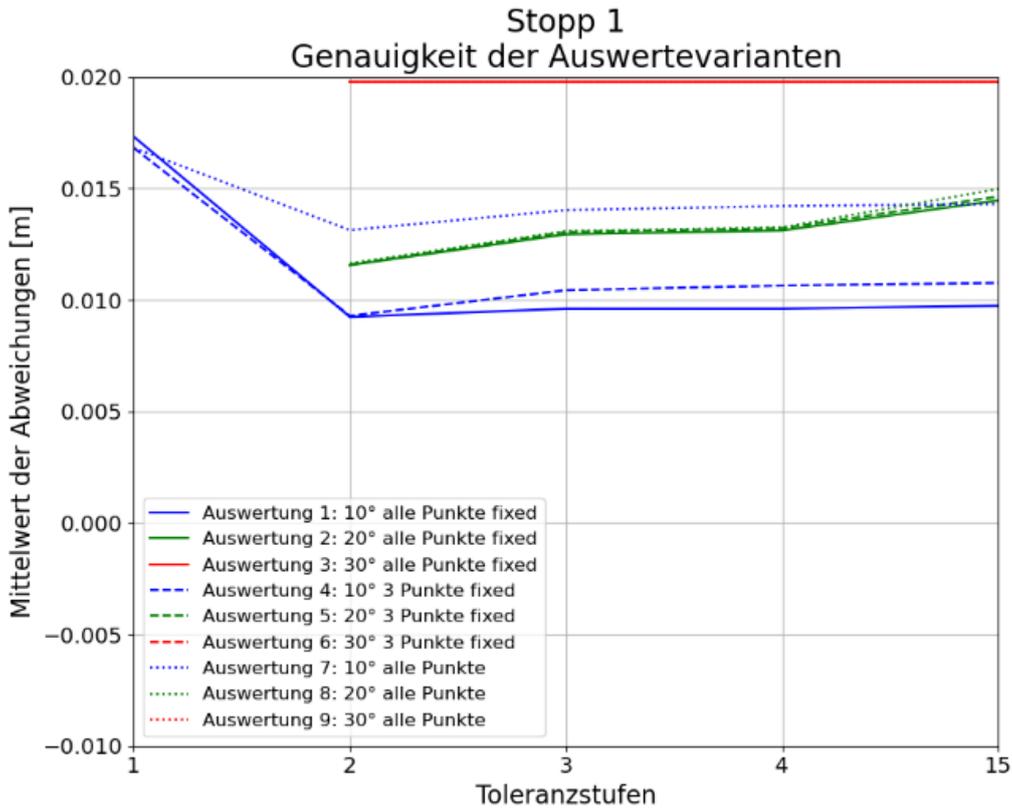


Abbildung 16: Stopp 1 – Genauigkeit

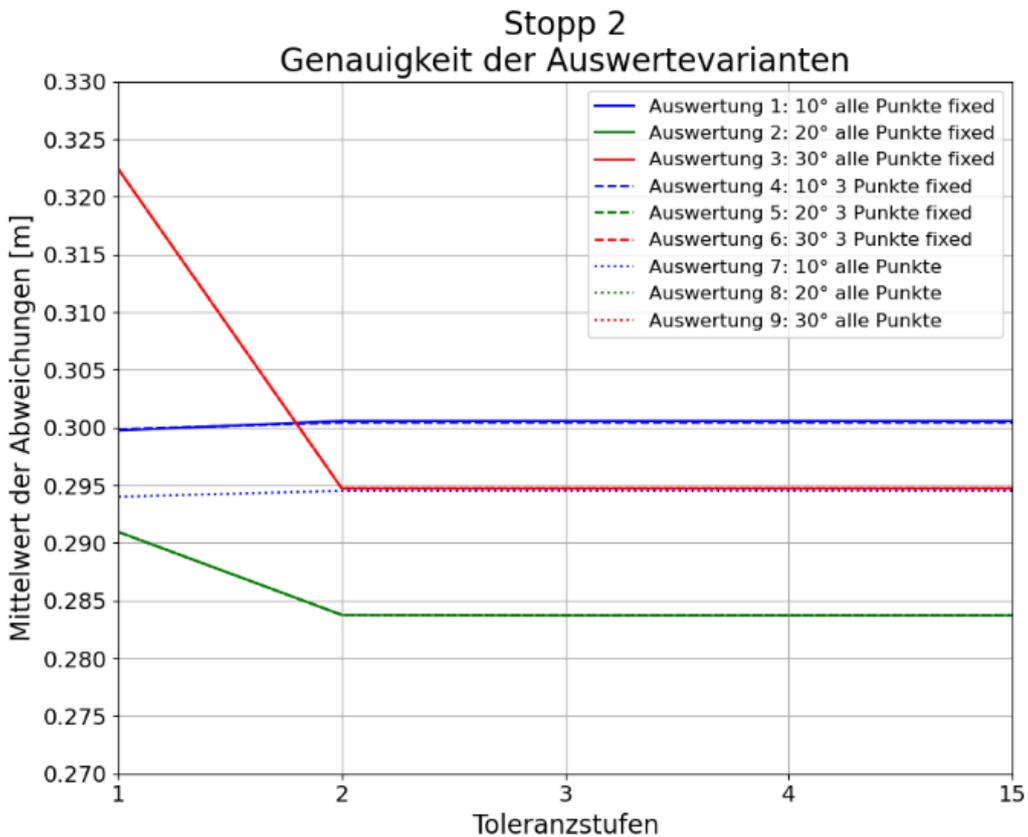


Abbildung 17: Stopp 2 – Genauigkeit

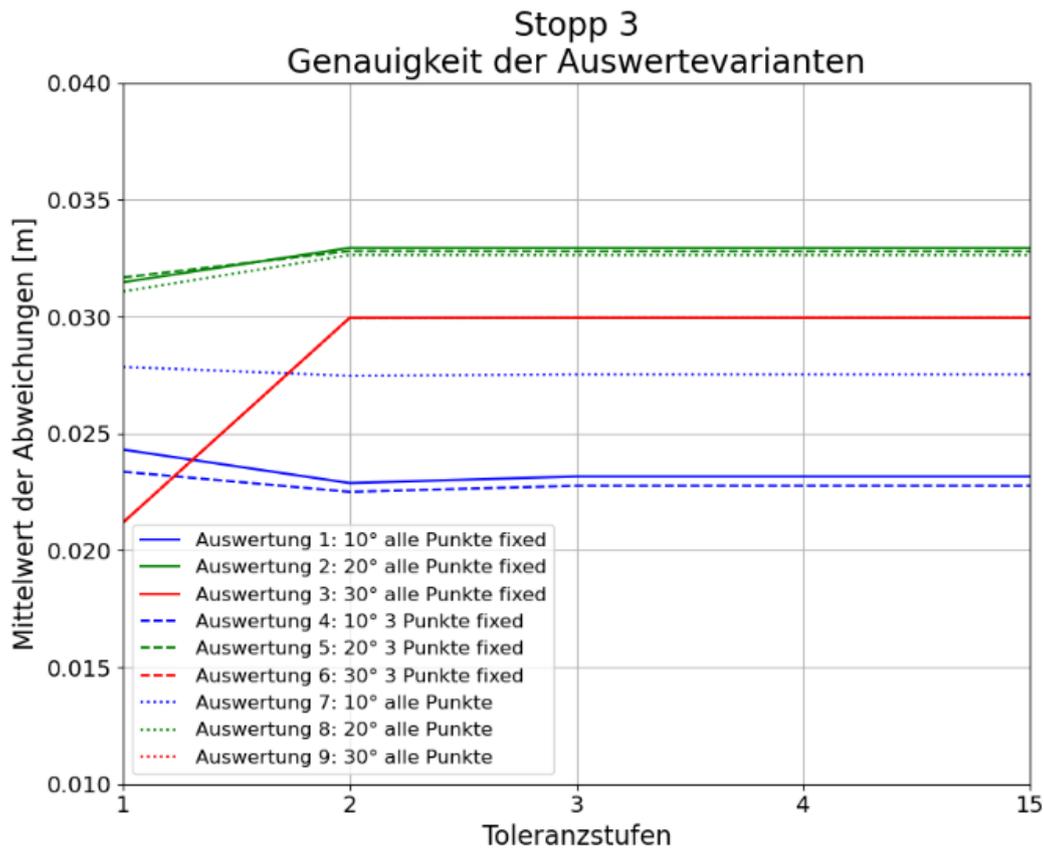


Abbildung 18: Stopp 3 - Genauigkeit

Bei genauerer Betrachtung zeigt sich, dass die Genauigkeit der Auswertevarianten bei Stopp 2 (Abbildung 18) zwischen 0.280m und 0.305m liegen, und bei den Stopps 1 (Abbildung 16) und 3 (Abbildung 18) zwischen 0.010m und 0.035m. Das lässt auf schlechte Empfangsbedingungen bei Stopp 2 schließen.

Weiters wurde die Standardabweichung der Auswertevarianten der Stopps untersucht und es hat sich gezeigt, dass diese bei allen Stopps im Bereich von 0.007m bis 0.017m liegen. Gründe für die hohe Abweichung von der Gleisachse beim Stopp 2, aber dennoch eine gute relative Genauigkeit, sprich gute Standardabweichung der Positionen, könnte eine ungenaue Erfassung des Gleises in diesem Bereich sein. Würde pauschal einen Betrag von 0.27m von den Abweichungen vom Stopp 2 abgezogen werden, würde sich ein sehr ähnliches Bild, wie bei den anderen Stopps ergeben und somit würden sich die kommenden Analysen auf alle Stopps beziehen.

7.2.1.1 Einfluss des Cut-Offs

Der Cut-Off scheint den größten Einfluss auf die Genauigkeit zu haben, und wenn jeder Stopp für sich betrachtet wird, scheint die Reihung nach den Genauigkeiten der verschiedenen Cut-Offs eindeutig. Jedoch ist diese Reihung von Stopp zu Stopp unterschiedlich. Weiters wird Toleranzstufe 1 vernachlässigt, weil teilweise eine sehr geringe Anzahl oder keine Punkte vorhanden sind, wie in Abbildung 19 dargestellt. Um die Unterschiede der Genauigkeiten der verschiedenen Cut-Offs bei den 3 Stopps besser vergleichen zu können werden diese in Tabelle 11 gezeigt.

Für den Vergleich der Genauigkeiten wird in der Tabelle 11 nur ein Wert für alle Toleranzstufen angegeben, da sich diese, außer in Toleranzstufe 1, welche aus Gründen der geringen Punkteanzahl ausgeschlossen wurde, ohnehin nicht relevant ändert.

	Cut-Off 10°	Cut-Off 20°	Cut-Off 30°
Stopp 1	0.010 m	0.013 m	0.020 m
Stopp 2	0.030 m	0.015 m	0.025 m
Stopp 3	0.023 m	0.033 m	0.030 m

Tabelle 11: Genauigkeit der Cut-Offs bei den jeweiligen Stopps

Hier lässt sich erkennen, dass bei Stopp 1 der Cut-Off von 10° die beste Genauigkeit erreicht, gefolgt von Cut-Off 20° und den schlechtesten Wert hält Cut-Off 30°. Beim zweiten Stopp hat Cut-Off 20° die beste Genauigkeit, Cut-Off 30° die zweitbeste und Cut-Off 10° weist die schlechteste Genauigkeit auf. Beim 3. Stopp liegt der Cut-Off 10° an erster Stelle, gefolgt von Cut-Off 30° und die schlechteste Genauigkeit hält Cut-Off 20°. Somit lässt sich kein eindeutiger Trend erkennen, aber die Tendenz, dass ein niedriger Cut-Off eher eine bessere Genauigkeit liefert als ein hoher.

7.2.1.2 Einfluss der Positionsqualität

Die Positionsqualität scheint einen sehr geringen Einfluss auf die Genauigkeit zu haben, die Linien der verschiedenen Varianten (Alle Punkte fixed, 3 Punkte fixed und alle Punkte) unterscheiden sich meist nur sehr gering, lediglich die Variante „Alle Punkte“ mit einem Cut-Off von 10° beim Stopp 1 unterscheidet sich von den anderen Cut-Off 10° Varianten um knappe 0.005m, siehe Abbildung 16.

7.2.1.3 Einfluss der inneren Geometrie

Der Einfluss der inneren Geometrie oder der Toleranzstufen, ist kaum erkennbar. Von Toleranzstufe 2 bis 15 ergeben sich nahezu horizontale Linien, siehe Abbildung 15. Daher ist die innere Geometrie vernachlässigen.

7.2.2 Punkteanzahl der Auswertevarianten

Die Punkteanzahl der Auswertevarianten spielt bei statischen Anwendungen, wie in diesem Fall bei den Stopps, eine untergeordnete Rolle. Es konnte zumeist ausreichend lang auf einer Position gemessen werden, um die erforderliche Genauigkeit zu erreichen. Sollte die geforderte Genauigkeit nicht innerhalb kurzer Zeit, in der Regel maximal ein paar Minuten, erreicht werden, liegt das meist an schlechten Signalempfangsbedingungen. Diese können durch zB. Abschattungs- oder Multipath-Effekte verursacht werden. In Abbildung 19 ist die Punkteanzahl der Auswertevarianten über die Toleranzstufen 1 bis 4 und 15 dargestellt. Die Toleranzstufen 5 bis 14 wurden ausgespart, da sich in diesem Bereich keine erkennbaren Änderungen abzeichnen.

Stopps Gesamt Punkteanzahl der Auswertevarianten

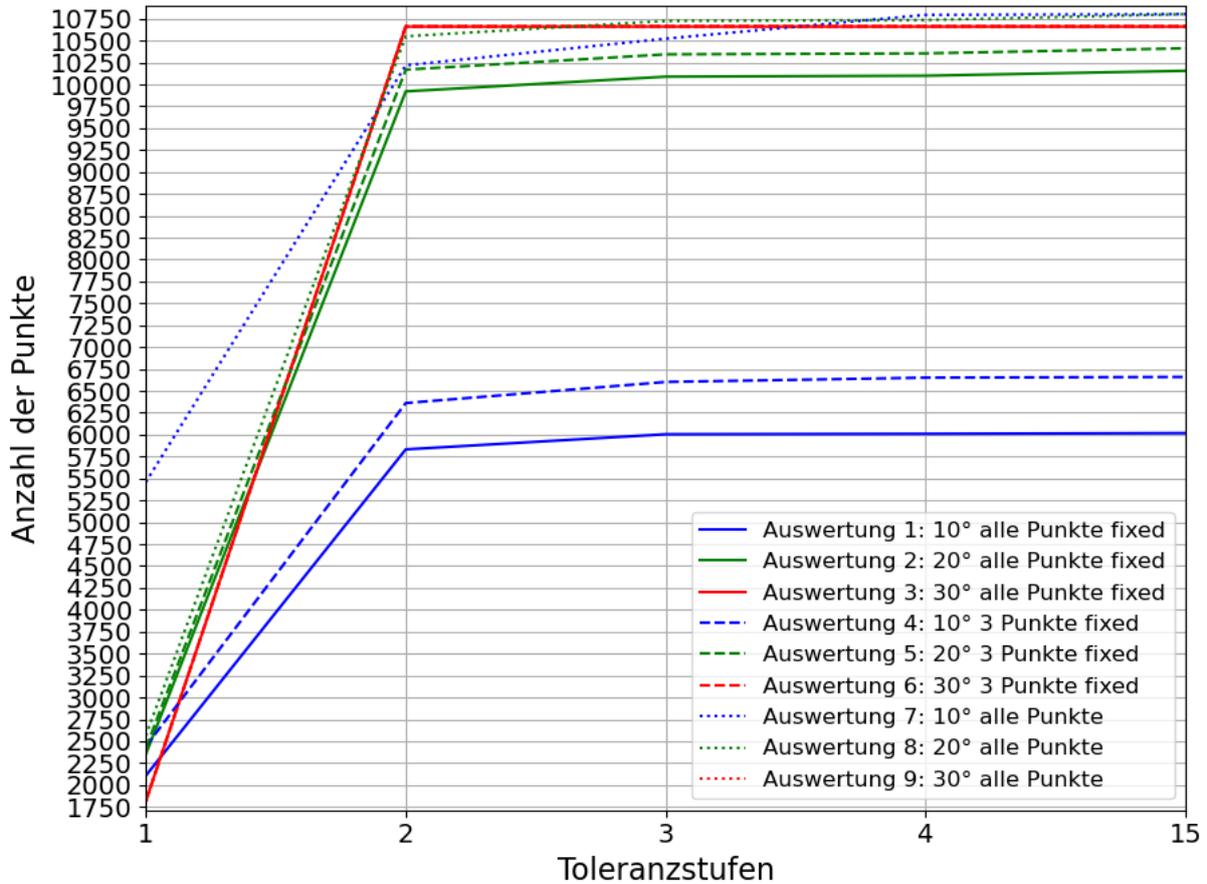


Abbildung 19: Punkteanzahl der Stopps gesamt

7.2.2.1 Einfluss des Cut-Offs

Der signifikanteste Einfluss des Cut-Offs zeigt sich bei den Auswertungen 1 und 4 im Gegensatz zu den anderen. Diese haben einen Cut-Off von 10° und erzielen in etwa 60% der Punkte im Vergleich zu den anderen Auswertungen. Auswertung 1 erreicht bis zu 6018 Punkte und Auswertung 4 bis zu 6659 Punkte. Alle anderen Auswertungen, inklusive Auswertung 7, welche auch einen Cut-Off von 10° ausweist, liegen im Bereich von 10155 bis 10802 Punkten.

7.2.2.2 Einfluss der Positionsqualität

Der Einfluss der Positionsqualität ist nicht eindeutig erkennbar, naturgemäß haben Auswertevarianten mit strengeren Filterkriterien weniger Punkte als Auswertevarianten mit lockereren Filterkriterien. Im Fall der Cut-Offs bei 10° hat die Positionsqualität einen deutlichen Einfluss auf die Punkteanzahl. Auswertung 1, welche „alle Punkte fixed“ voraussetzt, erreicht maximal 6018 Punkte, Auswertung 4 – „3 Punkte fixed“ gibt bis zu 6659 Punkte aus und Auswertung 7 mit der „Alle Punkte“-Variante, erreicht 10802 Punkte.

Bei den anderen Auswertevarianten liegt die Punkteanzahl zwischen 10155 und 10802. Dies entspricht einem Bereich von knapp 8% der maximalen Punkteanzahl.

7.2.2.3 Einfluss der inneren Geometrie

Die innere Geometrie wird durch die Toleranzstufen präsentiert. In Toleranzstufe 1 verbleiben in den meisten Auswertevarianten 1812 bis 2563 Punkte, bis auf Auswertung 7, diese basiert auf 5458 Punkten. Von Toleranzstufe 1 auf 2 legen alle Auswertevarianten 100 bis 500% an Punkten zu. Von Toleranzstufe 2 bis 15 sind die Veränderungen nur minimal.

8 Zusammenfassung

Ziel der Arbeit war es die Genauigkeit eines 4-Antennen GNSS-Systems auf einem Triebfahrzeug zu evaluieren. Dies wurde umgesetzt, indem das Triebfahrzeug, während der Messung, über ein Gleis gefahren ist, dessen Lage bekannt ist. Somit konnte die Position des Gleises aus der terrestrischen Messung mit der Position des Gleises aus der GNSS-Messung verglichen werden.

Die Auswertung wurde in zwei Teile unterteilt, eine kinematische Auswertung und eine statische Auswertung. Bei der kinematischen Auswertung wurden die Messdaten aller Fahrten zusammengefasst, welche länger als 4 Minuten dauerten. Für die statische Auswertung wurden die 3 längsten Stopps herangezogen. Für beide Auswertungen wurden die Messdaten durch die 3 Filterkategorien, Positionsqualität (Kapitel 5.2.1), innere Geometrie (Kapitel 5.2.2) und Cut-Off (Kapitel 5.1.3), in weitere Subauswertungen unterteilt.

Bei der kinematischen Auswertung hat sich gezeigt, dass die Toleranzstufen der inneren Geometrie, den größten Einfluss auf die Genauigkeit haben, siehe Abbildung 12. Da sich die Genauigkeiten von Toleranzstufe 1 bis 15 deutlich ändern, wurden die Toleranzstufen in 3 Bereiche unterteilt, siehe Tabelle 10. In diesen Bereichen haben jeweils unterschiedliche Filterparameter maßgebend Einfluss auf die Genauigkeit (siehe Kapitel 7.1.1.1). Im ersten Bereich hat der Cut-Off den größten Einfluss. Hier liefern höhere Cut-Offs bessere Genauigkeit als niedrige. Im zweiten und dritten Bereich zeigen Auswertungen mit der Positionsqualität „alle Punkte fixed“ die besten Ergebnisse. Ebenso wurde die Anzahl der Punkte, welche in eine Auswertung eingehen betrachtet, siehe Abbildung 14. Hier hat sich gezeigt, dass wieder die Toleranzstufen den größten Einfluss auf die Auswertungen haben (siehe Kapitel 7.1.2.1). In den einzelnen Bereichen hat die Positionsqualität den größten Einfluss auf die Punkteanzahl.

Die statische Auswertung ergibt, dass der Cut-Off scheinbar den größten Einfluss auf die Genauigkeit hat, siehe Kapitel 7.2.1. Die Positionsqualität und innere Geometrie haben einen nur kaum erkennbaren Einfluss auf die Genauigkeit. Die Punkteanzahl zeigt ein interessantes Bild. Bei Toleranzstufe 1 sind, im Vergleich zu den andere Toleranzstufen, deutlich weniger Punkte vorhanden, siehe Abbildung 19. Die Auswertevариante mit einem Cut-Off von 10° und der Positionsqualität, „alle Punkte“ weist dagegen einige Punkte mehr auf. In den Toleranzstufen 2 bis 15 haben 7 der 9 Auswertevариante Punktzahlen in einem engen Bereich von ca. 8% der maximalen Punkteanzahl. Die verbleibenden Auswertungen mit einem Cut-Off von 10° und den Positionsqualitäten „alle Punkte fixed“ und „3 Punkte fixed“ erreichen ca. 60% der Punkteanzahl der anderen Auswertungen.

Welche die optimalen Parameter für die Auswertung sind, hängt schlussendlich von den Anforderungen des Anwendungsfalles ab. Wird eine hohe Genauigkeit gefordert, sind die Parameter strenger zu setzen. Liegt der Fokus auf einer hohen Punkteanzahl, sind die Parameter lockerer zu wählen. Die Herausforderung wird wahrscheinlich darin liegen beide Anforderungen bestmöglich zu erfüllen.

Eine Empfehlung für ein möglichst hohe horizontale Punktgenauigkeit ist Auswertung 3 der Toleranzstufe 4. Diese hat einen Cut-Off von 30° , setzt alle Punkte „fixed“ voraus und lässt bei der inneren Geometrie eine Toleranz von 40mm zu. Der Mittelwert der Abweichungen beträgt

0.017m bei einer Standardabweichung von 0.066m. Diese Auswertung erreicht eine Punktzahl von 749.

Um mit einer Messfahrt entlang der Strecke ausreichend Punkte für eine Rekonstruktion der Gleisachse aufzunehmen, empfiehlt sich die Auswertung 6 bei Toleranzstufe 13. Diese setzt eine Cut-Off von 30°, verlangt „3 Punkte fixed“ und definiert eine Toleranz der inneren Geometrie von 1m. Der Mittelwert der Abweichungen beträgt 0.274m bei einer Standardabweichung von 0.531m. Diese Auswertung erreicht eine Punktzahl von 3082.

Eine Kompromisslösung stellt eine 4-fach Befahrung der Messstrecke mit Auswertung 8 bei Toleranzstufe 3 dar. Auswertung 8 definiert einen Cut-Off von 20° und verwendet „alle Punkte“ bei einer Toleranz der inneren Geometrie von 30mm. Der Mittelwert der Abweichungen beträgt 0.022m bei einer Standardabweichung von 0.081m. Diese Auswertung erreicht eine Punktzahl von 1244. Mit einer 4-fachen Vermessung der Strecke werden ausreichend Punkte für die Rekonstruktion mit einer guten Genauigkeit aufgenommen.

9 Literaturverzeichnis

BEV (2021). Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen. <http://www.bev.gv.at>.
[Online; Stand: 30.05.2021].

EPOSA (2021): Echtzeit Positionierung Austria. <https://www.eposa.at> [Online; Stand: 21.04.2021]

EUREF (2021). Reference Frame Sub-Commission for Europe. http://www.euref.eu/euref_egrs.html.
[Online; Stand: 05.04 2021].

Hofmann-Wellenhof, Bernhard / Lichtenegger, Herbert / Wasle, Elmar. 2008. GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo & more. SpringerWienNewYork, Wien (Österreich)

IDS-doris (2021). IRTS Center – Roadmap for IRTF2020. <https://ids-doris.org/images/documents/report/AWG201904/IDSAWG201904-Altamimi-ITRF2020roadmap.pdf>
[Online; Stand: 30.05 2021].

JAVAD (2021). JAVAD GNSS. <https://www.javad.com/jgnss>. [Online; Stand: 30.05.2021].

Kaplan, E. & Hegarty, C. (2017). Understanding GPS/GNSS - Principles and Applications. United States of America: Artech House.

LMI (2021). LMI Technologies Inc. Datenblatt 3.0 Gocator 2300 Serie.

Niemeier, W (2002): Ausgleichsrechnung. Walter de Gruyter, Berlin

Plasser & Theurer (2021). <https://www.plassertheurer.com>. [Online; Stand: 31.08.2021].

vdv-online.de (2021). https://www.vdv-online.de/fileadmin/user_upload/04_-_Blankenbach.pdf
[Online; Stand: 07.10.2021].

Wanninger, L (2006). Präzise Positionsbestimmung in Netzen von GNSS-Referenzstationen - Festschrift 125 Jahre. Universität Hannover. https://tu-dresden.de/bu/umwelt/geo/gi/gg/ressourcen/dateien/veroeffentlichungen/h125_263_wan.pdf?lang=de

Wikipedia (2021). <https://de.wikipedia.org/wiki/Fahrzeugkoordinatensystem> [Online; Stand: 07.10.2021].