

Journal of Applied Hydrography

HYDROGRAPHISCHE NACHRICHTEN

06/2025

HN 131

Ausbildung mit Inhalten
der Hydrographie



Untersuchung unterschiedlicher Methoden zur Positionsbestimmung und Verbesserung bei GNSS-Signalverlust in dynamischen Prozessen

Ein Beitrag von JOHANNES SISCHKA

Der Fachbeitrag behandelt die präzise Positionsbestimmung bei Echolotmessungen unter Brücken, wo GNSS-Signale gestört oder vollständig blockiert sind. Um genaue Trajektorien zu berechnen, werden GNSS- und Inertialdaten kombiniert und mit Nachprozessierungssoftware wie Qinertia ausgewertet. Drei Methoden werden verglichen: eng gekoppelte Nachprozessierung (TC_PPK), lose Echtzeitkopplung (LC-RTK) und lose Nachprozessierung mit Modellierung (LC_PPP). TC_PPK bietet insgesamt die höchste Genauigkeit, während LC-RTK robuster gegenüber GNSS-Ausfällen ist. Eine Kombination beider Methoden (LC-TC_PPK) liefert unter Brücken die besten Positionsgenauigkeiten. In der Praxis zeigt sich jedoch, dass der Zugewinn im Endergebnis gering ist, weshalb TC_PPK allein meist ausreichend ist.

Satellitenavigation | GNSS | Inertialnavigation | IMU | Brückendurchfahrt | Signalverlust | Trajektorie
satellite navigation | GNSS | inertial navigation | IMU | bridge crossing | signal loss | trajectory

This technical paper deals with precise position determination for echo sounder measurements under bridges where GNSS signals are disturbed or completely blocked. To calculate accurate trajectories, GNSS and inertial data are combined and analysed using post-processing software such as Qinertia. Three methods are compared: tightly coupled post-processing (TC_PPK), loose real-time coupling (LC-RTK) and loose post-processing with modelling (LC_PPP). TC_PPK offers the highest overall accuracy, while LC-RTK is more robust against GNSS failures. A combination of both methods (LC-TC_PPK) provides the best positioning accuracy under bridges. In practice, however, it has been shown that the gain in the final result is small, which is why TC_PPK alone is usually sufficient.

Autor

Johannes Sischka hat seine Bachelorarbeit in Kooperation mit der GEOGroup Süd-West an der Hochschule für Technik Stuttgart geschrieben. Jetzt arbeitet er bei der intermetric GmbH in Konstanz.

johannes.sischka@intermetric.de

Einleitung

Die Überwachung der Fahrrinnenbreite und -tiefe von Wasserstraßen als Transportweg ist für deren Nutzung zwingend notwendig. Diese Tiefenmessungen finden mit Echoloten statt. Dabei wird über Schallwellen und die Wasserschallgeschwindigkeit die Wassertiefe gemessen (Scheider 2021). Fächerecholote messen sogar mehrere Tiefenwerte in einem Bereich von links vom Boot bis rechts vom Boot, dessen Breite durch den Öffnungswinkel dieses Fächers definiert wird (Scheider 2021).

Um Echolotmessungen von einem Messschiff aus richtig georeferenzieren zu können, sind Satelliten- und Inertialmessungen nötig. In der Satellitenvermessung werden Signale von mehreren Navigationssatelliten (Global Navigation Satellite System, GNSS) an einer Antenne empfangen, sodass die Position der Antenne auf der Erde bestimmt werden kann (Bauer 2017; Joeckel et al. 2008; Längauer 2010). Für eine geodätische

Nutzung werden die Trägerwellen der Signale genutzt. Hierbei ist für eine genaue Vermessung die Festsetzung der Anzahl der Wellenlängen/die Lösung der Phasenmehrdeutigkeit elementar (Bauer 2017; Joeckel et al. 2008). Die Inertialmessungen liefern Informationen über lineare und rotatorische Beschleunigungen des Schiffs. Dazu werden Inertial Measurement Units (IMU) genutzt, elektromechanische Bauteile ähnlich einem Computerchip, die eben diese Beschleunigungen durch Stromstärken messen können (Scheider 2021). Diese beiden Systeme werden mit Hilfe von Kalman-Filtern gekoppelt (Längauer 2010; Foppe 2001). Dieses Werkzeug ist heutzutage Standard in dynamischen Prozessen wie einem sich bewegendem Boot. Es modelliert die Bewegungen des Boots, verbessert das Modell über Messwerte und kann vor allem die Genauigkeit des Modells und der Messungen schätzen (Scheider 2021; Längauer 2010).

Unter Brücken wird das Satellitensignal verfälscht oder es kommt zum vollständigen Signalverlust. Die Position kann nicht mehr über Satellitennavigation berechnet werden. Die Inertialnavigation kann unter Brücken messen, da alle erforderlichen Komponenten hierfür fest auf dem Boot verbaut sind. Allerdings können über die Inertialnavigation nur Positionsunterschiede gemessen werden (Scheider 2021).

Der Kerngedanke befasst sich nun damit, vor und hinter der Brücke eine absolute Position über die Satellitennavigation zu bestimmen, während der Weg des Schiffs unter der Brücke relativ zu den absoluten Positionen über die Inertialnavigation bestimmt wird. Da Positionsbestimmungen rein über Inertialmessungen auf lange Zeit Drifteffekten und Fehlern unterliegen, ist zu einer genauen Positionsbestimmung der Umgang mit den Sensordaten und ihre Verknüpfung essenziell (Scheider 2021; Längauer 2010).

Bereits während der Peilung wird der Fahrtweg des Bootes, die sogenannte Trajektorie, in Echtzeit aus Kombination der beiden Systeme berechnet. Genauere Trajektorien lassen sich aber mit einer Nachprozessierungssoftware berechnen. Die Software stellt dabei verschiedene Methoden zur Verfügung, die auf unterschiedliche Weise zu solch einer Trajektorie gelangen. Diese Methoden unterscheiden sich dabei hinsichtlich ihres Umgangs mit den Messungen aus Satelliten- und Inertialnavigation. Diese Arbeit befasst sich mit diesen unterschiedlichen Methoden und soll durch einen Vergleich die geeignetste Methode für diesen Problemfall finden.

Methodik

Die Messdaten, welche zur Untersuchung verwendet wurden, stammen von Peilungen der GEO Group Süd-West unter Brücken auf dem Rhein (Abb. 1). Bei der Peilung startet das Boot vor der Brücke unter freiem Himmel. Der GNSS-Empfänger initialisiert sich, das heißt, er löst die Phasenmehdeutigkeit. Anschließend fährt das Boot gerade auf die Brücke zu und das Fächerecholot beginnt, die Messungen aufzuzeichnen. Das Boot unterfährt geradlinig die Brücke. Dabei wird der Satellitenempfang gestört, es kommt zu Mehrwegeeffekten, Phasensprüngen, Abschattungen und schließlich zum Signalverlust. Hinter der Brücke ist das Signal nicht mehr gestört und die Antenne kann sich wieder initialisieren. Etwa 150 m hinter der Brücke wird die Aufzeichnung des Echolots beendet, das Boot wendet und ein neuer solcher Messstreifen wird begonnen. Die Messstreifen werden so gefahren, dass sich die Echolotmessungen um 50 % in beide Richtungen überdecken, sodass jede Stelle des Gewässerbetts zweifach bestimmt ist.

Die für die Untersuchung genutzte Postprocessing-Software ist Qinertia 3.4.304 von SBG. Diese

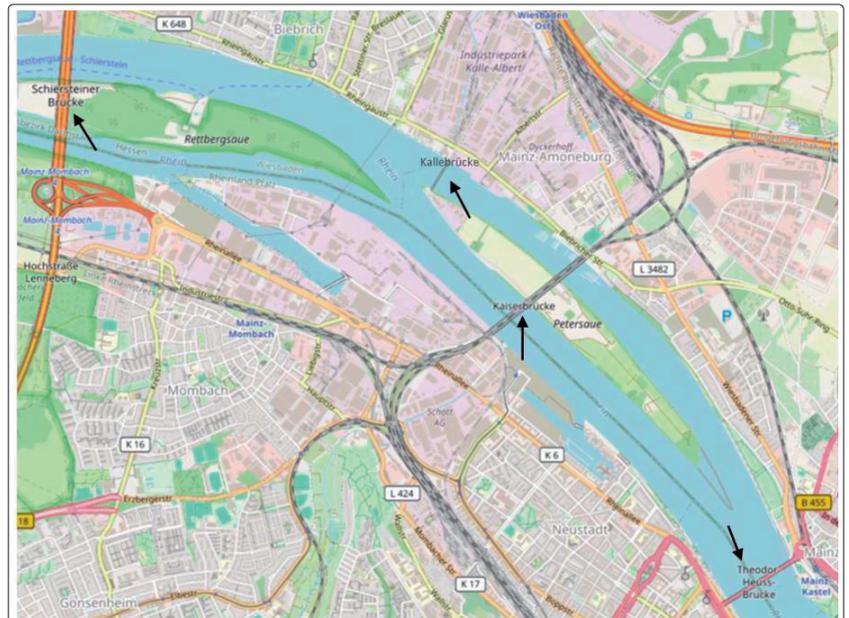


Abb. 1: Ausschnitt des Messgebiets zwischen Mainz und Wiesbaden mit der Hervorhebung der vier relevanten Brücken über den Rhein

Software stellt verschiedene Algorithmen zum Nachprozessieren zur Verfügung, welche auf unterschiedliche Weise GNSS-Daten behandeln und GNSS- und INS-Daten koppeln. Die für die Arbeit wichtigsten Filter sollen hier kurz erläutert werden.

- Tight Coupling Post Processed Kinematic (TC_PPK)
Die GNSS-Messungen werden in diesem Algorithmus durch Differenzenbildung verbessert. Die Differenzenbildung entsteht durch Messung der gleichen Satellitensignale an einer zweiten Antenne, der Referenzstation (Bauer 2017; Joeckel et al. 2008) – in diesem Fall mehrerer Referenzstationen von SAPOS. Hierbei werden präzise Ephemeriden genutzt. Das sind nachträglich berechnete Bahndaten der Satelliten und sehr viel genauer als die Bahndaten, die in Echtzeit vom Satelliten verschickt werden. Die Daten der Referenzstationen werden gemeinsam mit den Rohdaten aus GNSS-Messungen und den Rohdaten aus den IMU-Messungen eng gekoppelt. Das bedeutet, es findet eine gemeinsame Berechnung einer einzelnen Trajektorie aus allen Daten in einem zentralisierten Kalman-Filter statt (Längauer 2010; Foppe 2001). Die Daten werden einmal in Fahrtrichtung und einmal gegen Fahrtrichtung prozessiert.
- Loosely Coupling (LC)
Bei der Messfahrt wurde die Antennenposition über eine Virtuelle Referenzstation von SAPOS korrigiert, es findet also auch eine Differenzenbildung in Echtzeit während der Messung über das Real Time Kinematic-Verfahren (RTK) statt. Diese Trajektorie wird zunächst in einem eigenen Kalman-Filter ausgewertet und erst

anschließend in einem zweiten Filter mit den IMU-Messungen kombiniert (Längauer 2010; Foppe 2001). Daher spricht man hier von einer losen Kopplung. Auch hier werden die Daten einmal in Fahrtrichtung und einmal gegen Fahrtrichtung prozessiert. Zunächst wird nur die Kombination aus der RTK-Trajektorie mit den IMU-Messungen betrachtet (LC-RTK). Es ist aber auch möglich, andere Trajektorien einzulesen und diese mit den IMU-Messungen zu stützen, was später noch genutzt wird.

- Loosely Coupled Precise Point Positioning (LC_PPP)
Hier werden die GNSS-Daten nicht durch Differenzenbildung korrigiert, sondern die Fehlereinflüsse auf die Satellitensignale modelliert und in der Laufzeitmessung als Korrektur angebracht (Bauer 2017; Längauer 2010). Die Trajektorie wird berechnet und anschließend mit den IMU-Messungen lose gekoppelt. Auch hier findet eine Prozessierung in beiden Fahrtrichtungen statt.

Die drei Trajektorien werden nach der Prozessierung als lesbare ASCII-Dateien exportiert. Hierbei können die Positionen und deren Standardabweichungen sekundlich herausgeschrieben werden.

Die Trajektorie, deren GNSS-Trajektorie aus einer Modellbildung entsteht (LC_PPP), hat Standardabweichungen im Meterbereich, ist also unbrauchbar. Das ist auf die langen Initialisierungszeiten zu-

rückzuführen, welche dieses System benötigt. Die Festsetzung der Phasenmehrdeutigkeiten, welche für präzise Messungen zwingend notwendig ist, kann in den kurzen Zeiten, in denen das Boot vor und hinter der Brücke wendet, nicht erreicht werden. Vergleicht man die beiden noch übrigen Lösungen, fällt auf, dass bei der engen Kopplung (TC_PPK) durchschnittlich genauere Ergebnisse erzielt werden. Vergleicht man jedoch die Positionsgenauigkeiten explizit unter Brücken, kann die lose Kopplung (LC-RTK) eine bessere Genauigkeit schätzen. Gerade bei nur kurzen Brückendurchfahrten wird das deutlich. Bei längeren ist nach ein paar Sekunden TC_PPK genauer. Das lässt sich dadurch erklären, dass die Echtzeitmessung direkt hinter der Brücke die Phasenmehrdeutigkeit noch nicht festgesetzt hat – die nachprozessierte GNSS-Lösung schon.

Allerdings scheint die lose Kopplung besser mit dem Satellitensignalverlust selbst klarzukommen. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass in dem zentralisierten Kalman-Filter die Phasenmehrdeutigkeit mitgeschätzt wird. Bei den Phasensprüngen, welche im Randbereich der Brücken auftreten, führt dies zu Fehlern im gesamten Modell. Bei der separaten Betrachtung der einzelnen Rohdaten mit der losen Kopplung fallen grobe Fehler in einem der Systeme, IMU und GNSS, schneller auf. Da sich explizit mit groben Fehlern befasst wird, ist die dadurch robustere lose Kopplung für diesen Fall besser geeignet.

Auch fällt auf, dass LC-RTK selbst bei freiem Satellitenempfang die Höhengenaugkeit um etwa einen Millimeter besser schätzen kann (Abb. 2). Die Lagegenauigkeit bei freiem Empfang ist bei TC_PPK deutlich besser (Abb. 3).

Die naheliegende Idee ist nun, beide Methoden zu kombinieren. Qinertia bietet zwar keinen Loosely Coupled Post Processed Kinematic-Algorithmus. Allerdings kann für den reinen LC-Algorithmus jede beliebige Trajektorie verwendet werden. Also wird die TC_PPK erneut eingelesen und mit den IMU-Messungen lose gekoppelt (LC-TC_PPK). Auch diese Trajektorie wird nun hinsichtlich ihrer berechneten Genauigkeit untersucht. Unter Brücken weist sie eine deutlich höhere Positionsgenauigkeit als die beiden anderen Trajektorien auf (Abb. 2 und Abb. 3). Auch bei langen Brückendurchfahrten ist dies der Fall. Schließlich verwendet dieser Algorithmus nun eine Trajektorie, welche hinter der Brücke viel schneller die Phasenmehrdeutigkeiten festgesetzt hat. Erst recht im Vergleich mit der LC-RTK-Trajektorie hat man also einen deutlichen Genauigkeitsgewinn.

Die bis jetzt betrachteten Genauigkeiten sind allerdings nur berechnete innere Genauigkeiten der Trajektorie von Qinertia selbst. Um nachvollziehen zu können, ob dieser Genauigkeitsgewinn tatsächlich die Position und Ausrichtung des Echolots ver-

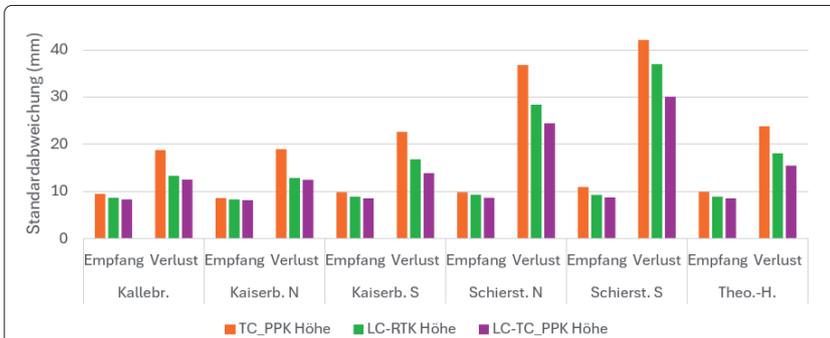


Abb. 2: Vergleich der Standardabweichungen in der Höhe zwischen den verschiedenen Methoden bei Satellitenempfang und bei Signalverlust bei den jeweiligen Brücken

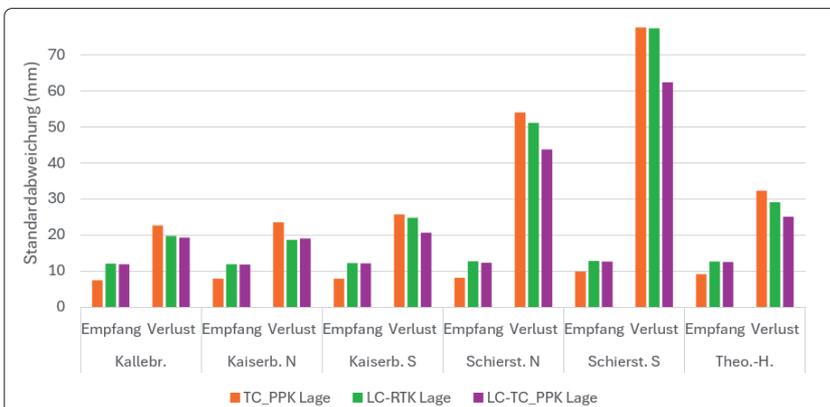


Abb. 3: Vergleich der Standardabweichungen in der Lage zwischen den verschiedenen Methoden bei Satellitenempfang und bei Signalverlust bei den jeweiligen Brücken

bessert, und um eine Aussage über die äußere Genauigkeit zu treffen, soll die Echolotmessung ebenfalls zur Bewertung genutzt werden.

Bei einer Messung mit Fächerecholot werden die Messstreifen überlappend gemessen. So werden gleiche Stellen des Gewässerbodens mehrmals aufgezeichnet. Zwei benachbarte Streifen müssen theoretisch zu 50 % übereinanderliegen. Die Echolotmessungen werden also an die Trajektorien angehängen und die daraus resultierenden Punktwolken verglichen.

Dabei wird Beamworx-Autoclean genutzt. Hier bilden alle Punkte innerhalb einer Kachel eines Rasters einen Mittelwert. Der Mittelwert ist die endgültige Höhe für das Unterwasser-Geländemodell. Die Streuung um diesen Mittelwert kann genutzt werden, um das Rauschen der Punktwolke zu untersuchen. Das Rauschen entsteht zwar auch durch die Unebenheit des Gewässerbetts, aber vor allem auch durch den Grad, um den sich zwei Messstreifen überlagern oder eben nicht.

Auch hier erreicht die LC-TC_PPK-Trajektorie die beste Lösung, da die Punktwolke das geringste Rauschen hat. Allerdings ist der Unterschied zur Punktwolke aus TC_PPK nur sehr gering. Werden die endgültigen Höhen der Kacheln betrachtet, sind die Unterschiede zwischen TC_PPK und LC-TC_PPK nur im Bereich weniger Millimeter. Einen nennenswerten Mehrwert schafft man dadurch also nicht. Im Vergleich zu LC-RTK jedoch haben beide Algorithmen ein sichtbar geringeres Rauschen um wenige Zentimeter. Auch die endgültigen Höhen unterscheiden sich in diesem Rahmen (Abb. 4).

Fazit

Man kann sehr gut mit dem Problem des Signalverlusts unter Brücken umgehen, indem man die Rohmessdaten nachprozessiert. Dafür gibt es verschiedene Methoden, die sich in der Art und Weise der Berechnung unterscheiden. Der beste Umgang mit den Satellitendaten ist die Verwendung einer (virtuellen) Referenzstation, sodass die systematischen Fehlereinflüsse auf das Signal korrigiert werden können. Diese Satellitendaten sollten unbedingt im Nachhinein prozessiert werden, da man die präzisen Ephemeriden nutzen kann. Außerdem kann der Fahrweg in Vorwärts- und Rückwärtsrichtung berechnet werden, was einen großen Einfluss auf die schnelle Festsetzung der Phasenmehrdeutigkeiten hat. Zuletzt kristallisierte sich die lose Kopplung bei der Fusion von IMU-Da-

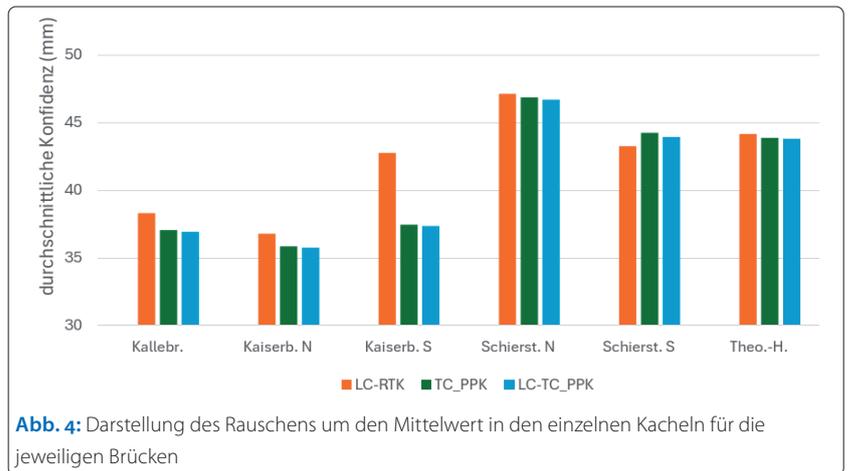


Abb. 4: Darstellung des Rauschens um den Mittelwert in den einzelnen Kacheln für die jeweiligen Brücken

ten mit den GNSS-Daten als am besten heraus, da diese am robustesten beim Umgang mit groben Fehlern ist. Bei der Verwendung von Qinertia rate ich dennoch zum Tight Coupling Post Processed Kinematic, da dieser Algorithmus bereits genau genug ist und man zum losen Koppeln einer differenziell berechneten Trajektorie den Umweg über das Exportieren und Neuimportieren einer Trajektorie gehen muss, und dabei keinen merklichen Gewinn im Ergebnis erzielt. //

Literatur

- Bauer, Manfred (2017): Vermessung und Ortung mit Satelliten. Wichmann Verlag, Berlin
- Foppe, Karl (2001): Kombination von inertialen und satellitengestützten Beobachtungsverfahren zur ingenieurgeodätischen Überwachung von Bauwerken. Dissertation, Universität Hannover, <http://userwww.hs-nb.de/~foppe/files/publications/Dissertation%20Foppe%202001.pdf>
- Joeckel, Rainer; Manfred Stober; Wolfgang Huep (2008): Elektronische Entfernungs- und Richtungsmessung und ihre Integration in aktuelle Positionierungsverfahren. Wichmann Verlag, Berlin
- Längauer, Klemens (2010): Trajektorienbestimmung mittels Integration von GNSS und IMS. Masterarbeit, TU Graz, <https://diglib.tugraz.at/download.php?id=576a772e03115&location=browse>
- Scheider, Annette (2021): Identifikation von Systemmodellen zur dreidimensionalen Zustandsschätzung eines Peilschiffs mit Propellerantrieb unter Verwendung eines Multi-Sensorsystems. Dissertation, Universität Stuttgart, DGK, https://dgk.badw.de/fileadmin/user_upload/Files/DGK/docs/c-868.pdf