

**Anlage zum Vorbericht zu TOP 1.2**  
der 28. Tagung des AK Geotopographie, 27.-29. April 2015, Mainz

**Softwareunabhängige Kontrolle der Ergebnisse von Aerotriangulationen  
(Handlungsempfehlung)**

## 1. Grundlagen

Bei einer Aerotriangulation (AT) werden geometrische und physikalische Messungen unterschiedlicher Verfahren räumlich in Beziehung zueinander gesetzt und nach der Methode der kleinsten Quadrate ausgeglichen.

Dieses iterative Verfahren gilt dann als abgeschlossen, wenn:

- keine groben Fehler mehr vorliegen;
- die Ergebnisse ausreichend genau sind, um qualifizierte Folgeprodukte abzuleiten;
- keine relevanten Änderungen mehr erreichbar sind, die Messwerte durch richtige Gewichtung in die Ausgleichung eingehen und keine systematischen Einflüsse mehr festzustellen sind.

Um dies zu erreichen, bieten die Softwarehersteller eine Reihe von Auswertungen und Fehlerbetrachtungen an, die zuverlässig systematische Einflüsse und Genauigkeiten der Aufnahmezentren ermitteln.

Wann eine AT genau genug ist, um Folgeprodukte qualifiziert abzuleiten, kann damit nicht hinreichend sicher bestimmt werden. Ziel ist es, mithilfe einfacher softwareunabhängiger Methoden die Ergebnisse von Aerotriangulationen zuverlässig und effizient zu prüfen. Dies gilt sowohl für eigene Ergebnisse als auch bei der Abnahme extern erbrachter Dienstleistungen.

Um eine Aussage über die Genauigkeit am Erdboden zu erhalten, können Passpunkte örtlich gemessen und anschließend im Rahmen der AT bestimmt werden. Diese Methode ist umfassend und zuverlässig, jedoch teuer und aufwändig.

Effizienter ist es, die Veränderungen der Koordinaten ausgewählter Verknüpfungspunkte – sogenannter Tiepoints – während der AT zu beobachten und sobald hier keine wesentlichen Verbesserungen mehr erreicht werden, die

Ergebnisse anzunehmen. Eine umfassende Probe erfolgt anschließend auf der Basis einiger weniger Tiepoints (Kontroll-Tiepoints). Zu diesen Kontroll-Tiepoints werden zusätzlich die Höhenwerte aus dem DGM1 ermittelt und mit den in der AT berechneten Höhen verglichen. Die Differenzen zeigen, ob die Ergebnisse einen Höhenshift aufweisen. Über die Methode der kleinsten Quadrate wird der mittlere Höhenfehler ermittelt. Auf Basis der empirisch belegten Annahme, dass die Lagegenauigkeit besser als die Höhengenaugigkeit ist, kann dann auch eine Aussage über die mittlere Lagegenauigkeit abgeleitet werden.

Fünf Mitglieder der PG ATKIS-DOP haben mit den Programmpaketen ISAT (ZI-Imaging / Hexagon), Match-AT (TRIMBLE) und Orima (Leica Geosystems / Hexagon) eine Aerotriangulation eines durch HE bereitgestellten Testblocks von etwa 100 Luftbildern durchgeführt. Die fünf Ergebnisse werden in der anschließenden Auswertung als Lösung bezeichnet. Die Genauigkeit wurde anschließend in Bezug auf das DGM1 bestimmt und verglichen.

## **2. Monitoring des Verlaufs der Aerotriangulation**

Tiepoints werden bei der Aerotriangulation automatisch gemessen und im Rahmen der Bündelblockausgleichung berechnet. Jeder Tiepoint verfügt nach jedem Rechenschritt über Lage- und Höhenkoordinaten. Ändern sich Ausgleichungsparameter, Gewichte, werden Fehler eliminiert usw., ändern sich auch die neu berechneten Tiepoint-Koordinaten. Es spielt dabei keine Rolle, ob mit örtlichen Koordinaten oder in einem definierten Bezugssystem gearbeitet wird. Es werden nur die Änderungen zwischen den Rechenläufen benötigt.

Damit sich nur die Verbesserungen der AT auf die Punktkoordinaten auswirken, müssen die Tiepoints fehlerfrei gemessen sein. Für das Monitoring reicht es aus, erst zum Ende der AT Kontroll-Tiepoints zu wählen. Dies schützt davor, dass ausgewählte Kontroll-Tiepoints oder ihre Verknüpfungen im Zuge der Iteration bei der automatisierten Fehlerbereinigung durch automatisches Löschen wegfallen. Solange nicht mit der Feinabstimmung in der AT begonnen wurde, wird auch kein Monitoring benötigt. Die Tiepoint-Koordinaten incl. der Kontroll-Tiepoints können aus einem Export-Listing nach Excel kopiert und nun einfach ausgewertet und grafisch dargestellt werden.

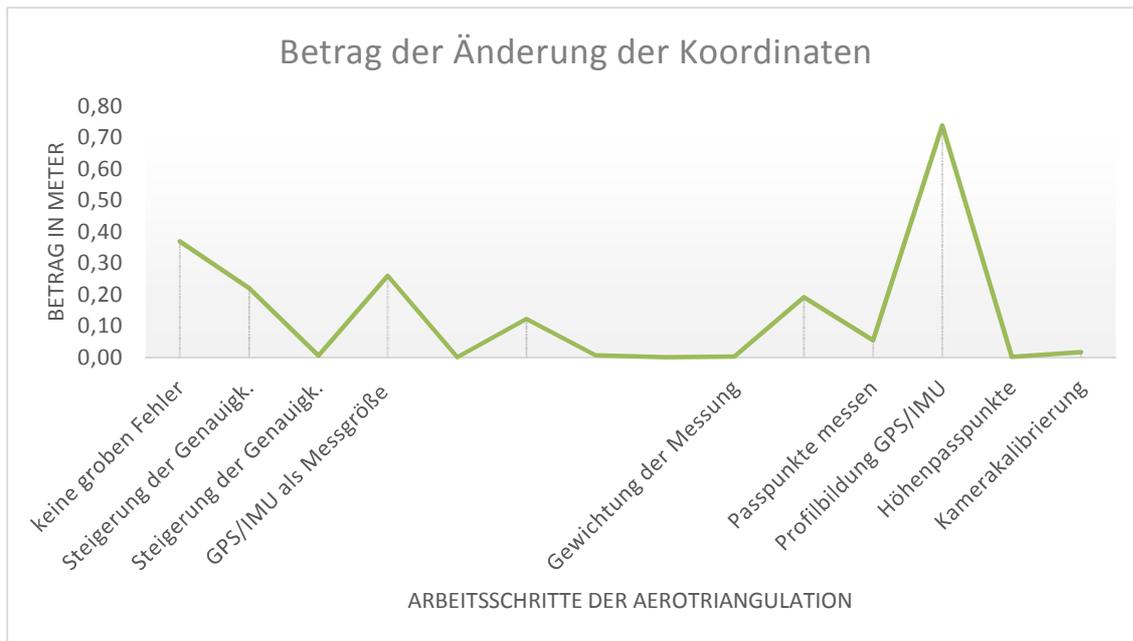


Abbildung 1: Monitoring eines Tiepoints im Verlauf einer AT

In der Abbildung 1 ist der Einfluss der einzelnen Arbeitsschritte auf einen Tiepoint grafisch dargestellt. Den größten Einfluss auf das Ergebnis hatte die Eliminierung eines systematischen Fehlers der IMU, ein Hinweis darauf, dass die Durchführung einer Boresightkalibrierung wichtig ist.

### 3. Endkontrolle einer Aerotriangulation

Die neutrale und softwareunabhängige Prüfung der Ergebnisse einer Aerotriangulation erfolgt über Vergleichsmessungen. Um flexibel zu sein und um den Aufwand der Passpunktmessungen zu umgehen, kann die Prüfung als Vergleich mit dem DGM1 durchgeführt werden. Hierbei wird die Höhe der Kontroll-Tiepoints aus dem DGM1 ermittelt und mit den in der AT berechneten Höhen verglichen. Da alle Bilder und Messungen durch die Bündelblockausgleichung miteinander in Beziehung stehen, reichen 15 Kontrollpunkte (Kontroll-Tiepoints) als Stichprobe für eine verlässliche Bestimmung der Standardabweichung aus.

Den unterschiedlichen Genauigkeiten

- der DGM1-Höhen (+/-10cm) und
- der AT-Höhen (+/-20cm)

wird mithilfe eines gewichteten Ansatzes Rechnung getragen.

Aus der Standardabweichung der Höhen kann auf die mittlere Genauigkeit der Lagebestimmung geschlossen werden. Diese ergibt sich aus Statistiken oder aus der empirischen Annahme, dass die Lagegenauigkeit ca. 3 Mal besser als die Höhengenaugkeit ist. Die Versuchsreihe bestätigte diese Annahme. De facto sind alle Lagegenauigkeiten besser als 1/3 der Bodenauflösung in Ordnung.

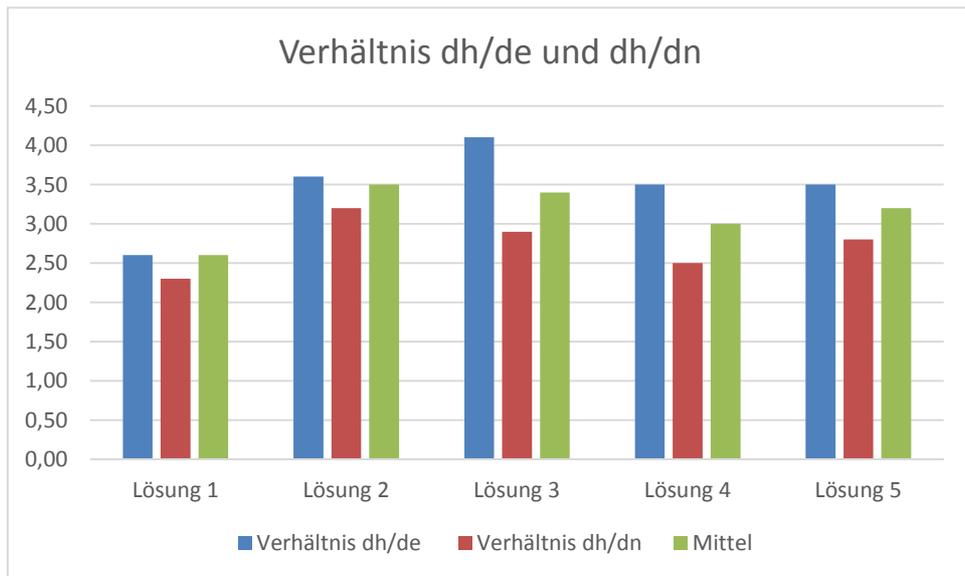


Abbildung 2: Im Rahmen der Versuchsreihe bestimmtes Genauigkeitsverhältnis zwischen Höhe und Lage.

Die Vergleichspunkte/Kontroll-Tiepoints müssen auf relativ ebener gut definierter Erdoberfläche (z.B. Straßenfläche) liegen, deren Höhe im DGM1 exakt erfasst und in der AT gut zu messen ist. Ob dabei während der AT automatisch gesetzte Tiepoints, die zufällig auf geeigneter Erdoberfläche liegen, oder Tiepoints im Rahmen der AT zur Kontrolle gezielt von Hand gemessen, herangezogen werden, ist unerheblich. Für die Untersuchung wurden je eingereicherter Lösung 15-20 Tiepoints nach ihrer Objektlage ausgewählt.



Abbildung 3: von Hand gemessener Tiepoint



Abbildung 4: Automatisch gesetzter Tiepoint, im GIS selektiert

Aus den Differenzen wird zunächst ermittelt, ob ein systematischer Höhenfehler vorliegt. Wenn keine Systematik vorliegt, ist die Summe der Abweichungen im Rahmen der Mess- und Rundungsgenauigkeit „0“.

<sup>1</sup> dh = Abweichung in Höhe / dn = Abweichung in Nordrichtung / de = Abweichung in Ostrichtung

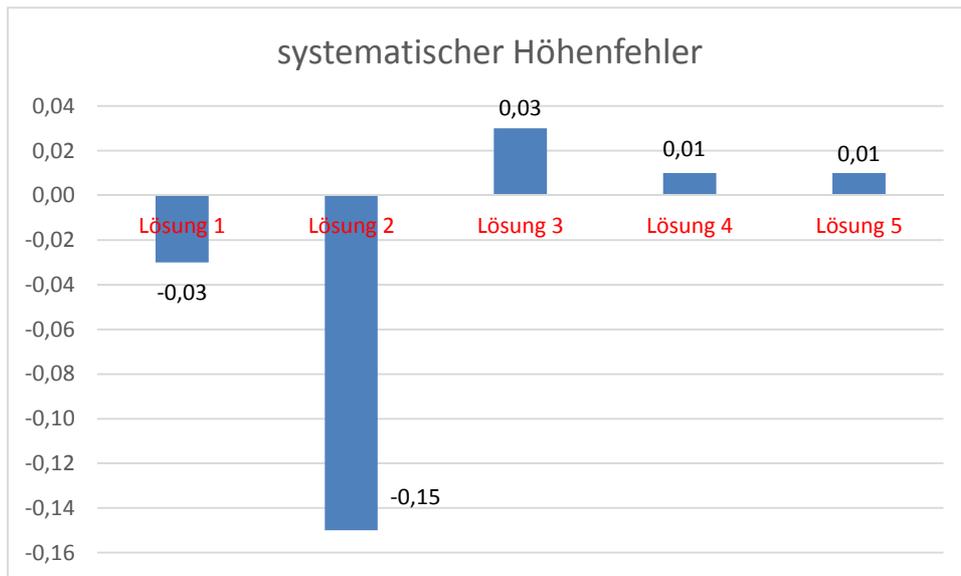


Abbildung 5: Summe der Abweichungen in Meter

Die Standardabweichung der Lage- und Höhengenaugkeit eines in der Aerotriangulation bestimmten Punktes ist in Abbildung 6 grafisch dargestellt.

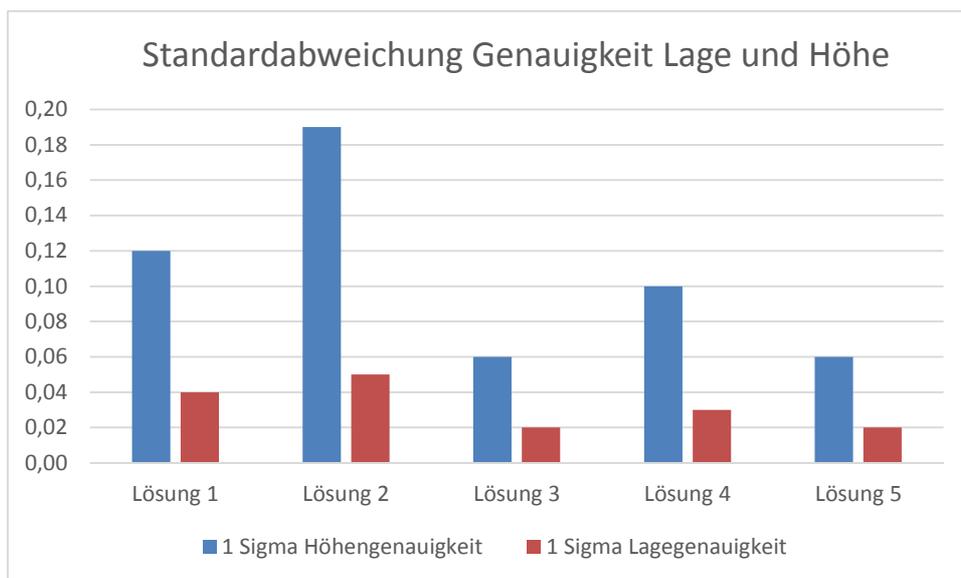


Abbildung 6: Ergebnis der Genauigkeitsbetrachtung in Meter

#### 4. Fazit

Die Interpretation der Tiepoints ermöglicht es, die Arbeitsschritte der Aerotriangulation auf ihre Wirksamkeit hin zu überwachen. Der Vergleich von einigen wenigen Tiepoints mit dem DGM1 liefert eine einfache und verlässliche Genauigkeitsaussage für Aerotriangulationen.