

Zeitschrift: Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik : VPK = Mensuration, photogrammétrie, génie rural

Herausgeber: Schweizerischer Verein für Vermessung und Kulturtechnik (SVVK) = Société suisse des mensurations et améliorations foncières (SSMAF)

Band: 90 (1992)

Heft: 12: Photogrammetrie und Informationssysteme in der RAV = Photogrammétrie et systèmes d'information dans le cadre de la REMO

Artikel: Aerotriangulation mit GPS

Autor: Ackermann, F.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-234892>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 22.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Aerotriangulation mit GPS

F. Ackermann

1. Relative kinematische Kamera Positionierung

Das NAVSTAR Global Positioning System (GPS) findet als allgemein zugängliches System für Navigation und Ortsbestimmung bzw. Positionierung bereits vielfältige Anwendung. Dank seines hohen Genauigkeitspotentials als Differenzverfahren ist es auch zur Punktbestimmung in Geodäsie und Vermessungstechnik eingeführt. Neuerdings eröffnet sich in zunehmendem Masse die Anwendung des GPS in der Luftbild-Photogrammetrie, und zwar ausschliesslich in Form der kinematischen Positionierung.

In der Photogrammetrie sind zwei verschiedene Anwendungen von GPS zu unterscheiden. Die erste betrifft die Bildflug-Navigation. Dabei erfolgt die GPS Positionierung des Flugzeugs durch die sog. Navigationslösung, auf der Basis von gleichzeitigen C/A-Code (oder P-Code) Pseudo-Range Messungen des GPS Empfängers im Flugzeug zu mindestens 4 Satelliten. Das Verfahren ist autonom und arbeitet in Echtzeit, d.h. die Position des Flugzeugs wird laufend berechnet und dem Piloten angezeigt. In Verbindung mit dem gespeicherten Flugplan kann über den Navigationsrechner eine gezielte Bildauslösung erfolgen und so eine ausserordentlich gleichmässige, geplante Bildüberdeckung erreicht werden. Die direkt erreichbare Navigationsgenauigkeit von 30 m – 50 m (ohne SA) ist auch für grossmassstäbige Befliegungen ausreichend. Für noch höhere Anforderungen können Differenz-Verfahren angewendet werden. Für die GPS Bildflugnavigation gibt es bereits mehrere kommerziell verfügbare Systeme.

Die zweite und wichtigste Anwendung von GPS in der Photogrammetrie betrifft die hochgenaue Positionierung von Kameras oder anderen Sensoren an Bord des Flugzeuges, insbesondere die Bestimmung der Aufnahmeorte von Luftbildern. Diese hochgenaue kinematische Positionierung beruht auf Phasennutzung der GPS Trägerwellen L1 bzw. L1 und L2, die aus Genauigkeitsgründen als Differenzverfahren (DGPS) erfolgt. Dabei wird neben dem Empfänger im Flugzeug ein zweiter, stationärer Empfänger benutzt, der mehr oder weniger in der Nähe des Aufnahmegebiets aufgestellt ist. Beide Empfänger messen gleichzeitig dieselben Satelliten an, und zwar mindestens 4. In der Praxis sollten es mindestens 5 oder 6 Satelliten sein, nach Möglichkeit in Konstellationen mit PDOP Werten ≤ 6 , höchstens ≤ 10 . Die gleichzeitige Messung mit mehr als 2 Empfängern, wie in der Geodäsie üblich, wird bisher in der Photogrammetrie aus operationellen Gründen nicht in Betracht

gezogen. Im Zusammenhang mit der Aerotriangulation ist eine Echtzeitlösung der Kamera-Positionierung unwesentlich. Wir haben es also mit der hochgenauen relativen kinematischen Kamera-Positionierung als Post-Processing Lösung auf der Basis differentieller GPS Phasennutzungen zu tun.

Die Grundlagen und Methoden der GPS Positionierung werden hier nicht dargestellt. Es ist bekannt, dass die direkte GPS Positionsbestimmung mit grossen systematischen Fehlern belastet ist, die bei der relativen Positionierung im Differenzverfahren fast vollständig eliminiert werden, das im übrigen auch die Auswirkungen der Signal-Verschlechterung durch «Selective availability» (SA) sehr weitgehend reduziert. Empirische Untersuchungen haben bestätigt, dass die innere Genauigkeit der Phasennutzungen bei 1 mm–2 mm liegt. Je nach der Geometrie der Satelliten-Konstellation (ausgedrückt im PDOP Wert) entspricht dem eine innere Positionierungsgenauigkeit von 1 cm–2 cm. Tatsächlich sind für die relative kinematische Kamera Positionierung im Flug Koordinatengenauigkeiten um 3 cm empirisch nachgewiesen worden (Friess 1990).

Das empirisch bestätigte hohe Genauigkeitspotential der GPS Kamera Positionierung macht sie geeignet für die Anwendung in der Aerotriangulation, insbesondere auch in der grossmassstäbigen Aerotriangulation. Im Zusammenhang mit der Aerotriangulation für Kartierungen im Massstabsbereich zwischen 1:2000 und 1:100 000 genügen Kamera-Positionsgenauigkeiten zwischen 0,1 m und 1,0 m oder mehr, sind also die Anforderungen in vielen Fällen gering.

Die Messungen und Berechnungen für die relative kinematische Kamera Positionierung bieten keine besonderen Probleme. Es treten jedoch im Zusammenhang mit der Anwendung für die Aerotriangulation einige Schwierigkeiten auf, die besonderer methodischer Aufmerksamkeit bedürfen. So wurde empirisch festgestellt, dass die GPS Kamera Positionierung in der Regel gewisse systematische oder Drift-Fehler aufweist, die allerdings in erster Näherung linear sind. Weiterhin werfen Signal-Sprünge oder -Unterbrechungen sowie die Datum-Transformation in ein Landes-system gewisse Probleme auf. Darauf wird im folgenden kurz eingegangen.

2. GPS Drift-Fehler und Datum-Transformation

Auf die notwendige Exzentrizitäts-Reduktion von der GPS Antenne, auf die sich die GPS Messungen beziehen, auf die Ka-

mera bzw. den Sensor im Flugzeug soll hier nur hingewiesen werden. Ebenso müssen die GPS Messungen auf die Zeitpunkte der Bildaufnahmen reduziert werden (es sei denn es wird Koinzidenz erzwungen). Hauptsächlich wegen der dabei notwendigen Interpolation des Flugwegs ist eine hohe GPS Messrate von $\geq 1/\text{sec}$ erforderlich.

Der erste Problemkomplex mit methodischen Auswirkungen betrifft die sog. Drift-Fehler der hochgenauen kinematischen GPS Positionierung und die Signalunterbrechungen. Es wird ja die kontinuierliche Verfolgung des Flugweges bzw. die Bestimmung der Luftbild-Aufnahmepositionen über den ganzen Flug hinweg angestrebt. Tatsächlich sind aber bei der kinematischen Positionierung mit der Phasendifferenz Methode vielfach kleine systematische Fehler, d.h. als Funktion der Zeit bzw. des Flugwegs lineare Driftfehler festgestellt worden, die durchaus Beträge von 0,5 m pro Stunde Flugzeit annehmen können. Es ist eine unter Experten kontroverse Frage, ob derartige Driftfehler bei dem 2-Empfänger-System der Photogrammetrie grundsätzlich vermeidbar wären, vor allem bei grossen Abständen zwischen Flugzeug und stationärem Empfänger und bei Flugzeiten von mehreren Stunden Dauer. Diese Frage verliert aber, jedenfalls im Zusammenhang mit der Aerotriangulation, ihre Bedeutung, da sie mit den Erscheinungen der Signalunterbrechung, der sog. Cycle Slips und der Satelliten-Konstellationswechsel in Verbindung steht, die alle zu Unterbrechungen oder Sprüngen in der GPS Trajektorie des Flugzeugs führen. In diesem Fall tritt stets das Problem der Vieldeutigkeit der Phasennutzungen auf.

Die Phasennutzung an den GPS Trägerwellen bestimmt nur den Verschiebungsbetrag innerhalb einer Wellenlänge. Sie ist deshalb bezüglich des gesuchten Abstandes zwischen Satellit und Empfänger extrem vieldeutig, da die Anzahl der vom Signal durchlaufenden Wellenlängen nicht erfasst wird. Diese sog. Phasenvieldeutigkeit (ambiguity) wird bei der GPS Positionierung jeweils für jedes Satelliten-Signal als Unbekannte geführt, die getrennt bestimmt werden muss. Dabei geht es zunächst nur um die sog. Anfangsvieldeutigkeit, da der Empfänger die weiteren Veränderungen auch im Flug kontinuierlich verfolgen kann, sozusagen angekoppelt bleibt, bis eine Signalunterbrechung auftritt. Zur Bestimmung der Phasenvieldeutigkeit musste man bisher auch mit dem Flugzeugempfänger von einem bekannten GPS-Punkt ausgehen oder vor dem Start mit stationären Messungen die Basislinie zum stationären Empfänger bestimmen. Die ursprünglich erforderliche Messzeit von etwa 1 Stunde ist heute durch schnelle Vieldeutigkeitslösungen auf wenige Minuten reduziert.

Technique de mensuration

Unglücklicherweise kann man sich nicht darauf verlassen, dass die Anfangslösungen der Phasenvieldeutigkeiten über den ganzen Flug gültig bleiben. Es gibt verschiedene Effekte, welche im Flug Signalunterbrechungen oder -sprünge verursachen. Sie sind bekannt als «Cycle Slips», sprunghafte Änderung der im Empfänger erfassten Satelliten-Kombination und Abschattung der Signale im Kurvenflug. Ohne auf die Ursachen näher einzugehen ist als Ergebnis von Signalunterbrechungen festzuhalten, dass die jeweilige Phasen-Vieldeutigkeitslösung verloren ist und durch Anhängen neu bestimmt werden muss. Man bemüht sich derzeit, durch entsprechende Software-Entwicklung Lücken und Sprünge in der GPS Trajektorie durch neue oder korrigierte Vieldeutigkeitslösungen zu schließen. Dazu werden etwaige nicht gestörte Signale verwendet sowie Pseudo-Range Messungen und Kalman-Filtertechniken in Verbindung mit der stochastischen Modellierung des Flugwegs herangezogen. Bei längeren Signalunterbrechungen gelingt es aber nicht unbedingt, die Vieldeutigkeit exakt zu lösen. Nun ist bekannt, dass die GPS Positionierung schon auf kleine Fehler in der Vieldeutigkeitslösung empfindlich mit systematischen Drift-Fehlern reagiert, die allerdings in erster Näherung linear sind (Friess 1990). Geht man nun praktisch davon aus, dass Signalunterbrechungen z.B. im Kurvenflug nicht völlig ausgeschlossen werden können, muss man bis auf weiteres mit der Möglichkeit rechnen, dass Driftfehler auftreten können, als Folge unvollständiger Vieldeutigkeitslösungen oder aus anderen Gründen. Zieht man andererseits in Betracht, dass Driftfehler nachträglich im Zusammenhang mit der Aerotriangulation korrigiert werden können, kommt man zu dem Schluss, dass keine besonderen Anstrengungen gemacht zu werden brauchen, um Driftfehler völlig zu vermeiden oder direkt zu kompensieren. Dies gilt allerdings nur bei GPS

Befliegungen für die Aerotriangulation. Und wenn schon während des Fluges mit möglicherweise mehrfachen Signalunterbrechungen und entsprechend verschiedenen Driftfehlern zu rechnen ist, besteht auch keine Veranlassung mehr, vor dem Flug die Anfangs-Vieldeutigkeiten sehr genau zu bestimmen.

Der Verfasser vertritt somit die Auffassung, dass jedenfalls derzeit für Aerotriangulationsbefliegungen zugunsten der operationellen Freiheit normalen Flugverhaltens, dem keine zusätzlichen Zwänge auferlegt werden sollten, lineare systematische Driftfehler in Kauf genommen werden können. Die GPS Empfänger brauchen erst eingeschaltet zu werden, kurz bevor das Aufnahmegebiet erreicht ist. Falls Driftfehler auftreten, z.B. im Zusammenhang mit rechnerisch nicht vollständig korrigierten Signalunterbrechungen in Kurvenflügen, werden sie nachträglich bei der Blockausgleichung der Aerotriangulation durch zusätzliche Parameter modelliert und kompensiert.

Der zweite Problemkomplex, der sich besonders bei der GPS Kamera Positionierung für die Aerotriangulation stellt, betrifft die Datum-Transformation in das jeweilige Landes-Bezugssystem und im Zusammenhang damit die Frage der Passpunkte. GPS Positionierungen beziehen sich zunächst stets auf das rechtwinklig-kartesische GPS Koordinatensystem WGS 84, das natürlich stets in ein lokales Horizontal-System transformiert werden kann, z.B. mit dem stationären Empfänger als Referenzpunkt. Es muss auch erwähnt werden, dass die GPS gestützte Aerotriangulation in diesem Bezugssystem durchgeführt werden könnte, wobei im Prinzip keine Passpunkte benötigt würden, sofern die GPS Messungen keine Unterbrechungen oder Driftfehler aufweisen.

In der Praxis müssen sich aber die Ergebnisse einer Aerotriangulation (und der nachfolgenden Kartierung) in Lage und Höhe auf ein Landes-Referenzsystem be-

ziehen. Die notwendige Datum-Transformation kann leider noch nicht mit Sub-Dezimeter-Genauigkeit absolut bereitgestellt werden sondern wird, wie in der Photogrammetrie üblich, mit Hilfe von Passpunkten besorgt, die in die gemeinsame Ausgleichung eingebracht werden, welche (lineare) Korrekturen an einer vorläufigen Datum-Transformation im Ausgleichungsansatz enthält. Da die Passpunkte bei der GPS gestützten Aerotriangulation praktisch keine Genauigkeitsfunktion mehr zu tragen haben, genügen für die Datum-Transformation einige wenige Passpunkte. In der Regel werden 4 Lage- und Höhenpasspunkte in den Blockecken angesetzt. Diese Passpunktanordnung erlaubt gleichzeitig auch eine blockweise Drift-Korrektur (die als Datum Transformation interpretierbar ist) und setzt im übrigen die kontinuierliche GPS Kamera Positionierung über den gesamten Flug ohne bzw. mit geheilten Unterbrechungen voraus. 4 Passpunkte sind nicht ausreichend, um implizit das Geoid zu berücksichtigen, das aber den Höhen superponiert werden kann, soweit es bekannt ist.

Falls jedoch, wie oben besprochen, mit dem Auftreten mehrfacher, unabhängiger Driftfehler gerechnet werden muss, die in der Blockausgleichung mit entsprechenden, im Extremfall streifenweisen Parameter-Ansätzen aufgefangen werden müssen, genügen 4 Passpunkte nicht mehr ohne weiteres. In diesem Fall würden bei der Blockausgleichung Singularitäten auftreten. Sie können entweder durch zusätzliche (Höhen-)Passpunkte oder durch Querstreifen aufgefangen werden. In Abbildung 1 sind die wichtigsten schematischen Szenarios zusammengestellt. Für die Praxis wird insbesondere der Fall b empfohlen, bei dem 4 Passpunkte (oder 4+4) und zwei ebenfalls GPS-gestützte Querstreifen vorgesehen sind. Die Querstreifen erlauben, in der Blockausgleichung Parameter für lineare Driftkorrekturen anzusetzen, je nach Bedarf in ver-

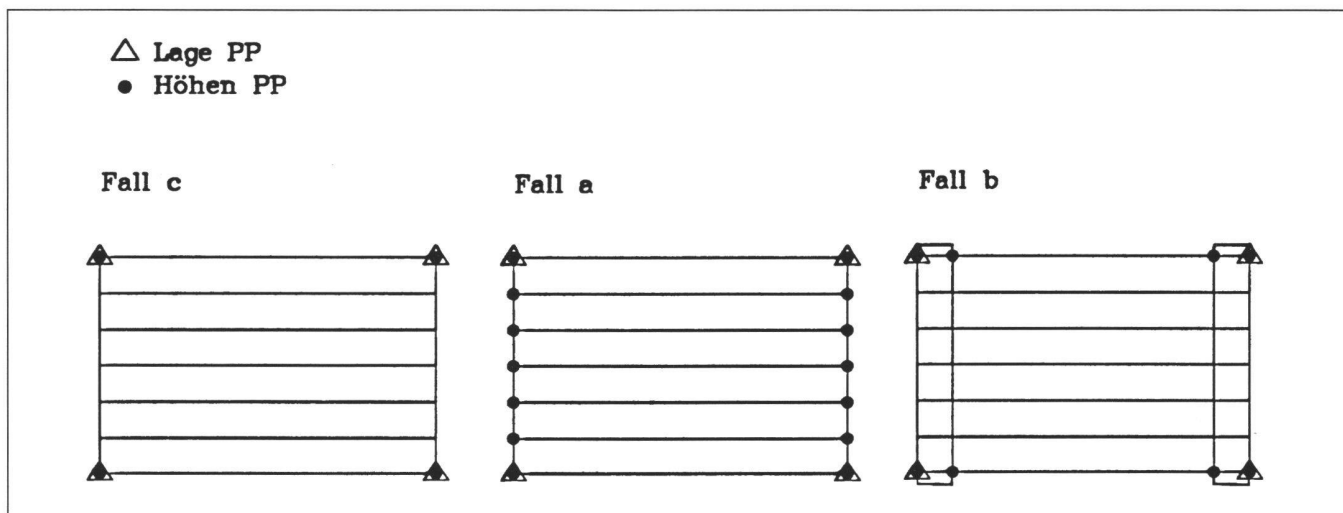


Abb. 1: Passpunkt - und Überdeckungs-Szenarios für GPS Blöcke.

schiedenen Kombinationen, im Extremfall für jeden Streifen getrennt. Im Grunde handelt es sich um eine operationelle Sicherheitsmassnahme, damit ein Flug nicht verloren ist, falls nicht voll überbrückbare Signalunterbrechungen auftreten sollten. Falls man mit einem gemeinsamen Satz von Driftparametern im Zusammenhang mit der Datum Transformation auskommt, brauchen die zusätzlich geflogenen Querstreifen nicht einmal ausgewertet zu werden.

3. Kombinierte GPS-Blockausgleichung

Die Verwendung der GPS Positionierung der Luftbild-Aufnahmestationen in der Aerotriangulation besteht in der Einbeziehung der GPS Daten in die gemeinsame Blockausgleichung. Es wird vorausgesetzt, dass die Vorbereitung, Messung und Datenreduktion der Aerotriangulation in der üblichen Weise durchgeführt wird, insbesondere auch bezüglich der Anzahl, Auswahl und Übertragung der Verknüpfungspunkte. Auf die sichere Identifizierung der wenigen Passpunkte ist ganz besonders zu achten. Die GPS Kamera Stationskoordinaten werden nach vorläufiger Transformation in das (Landes-)Bezugssystem als zusätzliche Beobachtungen für die unbekannten Luftbild-Projektionszentren behandelt und entsprechend gewichtet in die gemeinsame Blockausgleichung eingebracht. Die Behandlung zusätzlicher Beobachtungen in der Blockausgleichung ist bekannt und bedeutet keine besondere Schwierigkeit, zumal die bekannte Matrix Struktur der Normalgleichungen und der reduzierten Normalgleichungen erhalten bleibt.

Für die Behandlung der Datum Transformation wie auch der Driftfehler werden zusätzliche unbekannte Parameter eingesetzt, die in der gemeinsamen Blockausgleichung gelöst werden. Auch diese Erweiterung ist in der Blockausgleichung bekannt und stellt keine besondere Schwierigkeit dar. Die Auswahl der Driftparameter richtet sich nach den Gegebenheiten des Fluges bezüglich der zu befürchtenden systematischen GPS Fehler, im Zusammenhang mit den gegebenen Passpunkten bzw. Querstreifen, gemäss Abbildung 1. Der entscheidende Punkt ist dabei, dass numerische Singularitäten oder Beinahe-Singularitäten in der Blockausgleichung vermieden werden müssen. Die Blockprogramme müssen in der Lage sein, sowohl ohne Driftparameter zu arbeiten als auch blockweise, gruppenweise oder streifenweise Parameter-Ansätze einzuführen. Derartige Software-Programme mit variablen Parameter-Ansätzen für die gemeinsame Blockausgleichung sind entwickelt und bereits in der Anwendung, und zwar für die Bündelmethode der Blockausgleichung wie auch für die Methode der unabhängigen Modelle.

4. Genauigkeitseigenschaften GPS-gestützter Blöcke

4.1 Theoretische Erkenntnisse

GPS-gestützte photogrammetrische Blöcke erhalten durch die gemeinsame Blockausgleichung ausserordentlich günstige Genauigkeitseigenschaften, was ein Hauptmotiv der GPS-Anwendung für die Aerotriangulation bildet. Die mit GPS hochgenau bestimmten Luftbild-Aufnahmeorte wirken in der Blockausgleichung im wesentlichen wie Passpunkte an den Projektionszentren. Im Ergebnis sind daher die Blöcke generell sehr gut kontrolliert, selbst wenn zusätzliche Driftparameter die Geometrie eines Blockes schwächen. Es ist abzusehen, dass die GPS-Messungen die Fehlerfortpflanzung im Block weitgehend unterdrücken und deshalb die Anzahl der Passpunkte drastisch reduziert werden kann, die im Endeffekt nur noch für die Datum Transformation benötigt werden. Im übrigen sorgen die GPS-Messungen der Projektionszentren für eine sehr gleichmässige Genauigkeitsverteilung im ausgeglichenen Block. Aus diesem Grund ist die Genauigkeit auch nur sehr wenig (5–10%) von der Blockgrösse abhängig.

Die genannten Genauigkeitseigenschaften lassen sich weitgehend aus der Anschauung ableiten. Tatsächlich sind sie durch eine Reihe theoretischer Untersuchungen, entweder durch Computer-Simulation oder durch theoretische Fehlerfortpflanzung, bestätigt und präzisiert worden. Neuere Untersuchungen (Ackermann 1992) haben aufgezeigt, dass die Genauigkeit ausgeglichener GPS Blöcke in erster Linie durch das verwendete Passpunkt- und Überdeckungsszenario (nach Abb. 1) im Zusammenhang mit den Datum- und Driftparametern der gemeinsamen Ausgleichung bestimmt wird. Im Vergleich dazu ist der Einfluss der Blockgrösse, der Passpunktgenauigkeit und sogar der GPS-Genauigkeit von sekundärer Bedeutung, solange sie keine extremen Werte annehmen. In Abbildung 2 und Ab-

bildung 3 sind die theoretischen Lage- und Höhengenaugkeiten eines mittelgrossen GPS-Bündelblocks (6×21 Bilder) für die verschiedenen Szenarios in Abhängigkeit von der Koordinaten-Genauigkeit (σ_{GPS}) der GPS Kamera Positionierung zusammengestellt. Alle Angaben sind auf die Messgenauigkeit (σ_0) der photogrammetrischen Bildkoordinaten bezogen, da nur die Gewichtsverhältnisse von Bedeutung sind. Für die Genauigkeit der Passpunkt-koordinaten ist angenommen, dass sie der photogrammetrischen Messgenauigkeit entspricht ($\sigma_{pp} = \sigma_0$, projiziert in das Gelände), was als praktisch vernünftige und realistische Annahme anzusehen ist.

Wenn man in den Diagrammen der Abbildungen 2 und 3 die (linken) Teile der Kurven betrachtet, die sich auf eine relativ genaue GPS Kamera Positionierung ($\sigma_{GPS} \leq \sigma_0$) beziehen, stellt man fest, dass das Szenario der Passpunkte und der Datum- bzw. Driftparameter die Blockgenauigkeit bestimmt. Falls man die GPS Positionierung absolut verwenden kann, d.h. keine über Passpunkte bestimmte Datum Transformation und keine Driftfehler ansetzt (Fall c (1)), erhält man die genauesten Ergebnisse. Der Block weist in diesem Fall praktisch keine Fehlerfortpflanzung auf. Seine Genauigkeit entspricht im Grenzfall ($\sigma_{GPS} = 0$) mit $\mu_{x,y} = 1.0 \sigma_0$ und $\mu_z = 1.4 \sigma_0$ etwa der reinen Einschneidegenauigkeit der homologen Bildstrahlen. Sobald aber über Passpunkte bestimmte freie Datum Transformationen und Driftkorrekturen angesetzt werden, erhöht sich das Fehlerniveau generell, selbst wenn die Passpunkte und die GPS Daten fehlerfrei sind. Im Fall c (2) mit 4 Passpunkten und freier Datum Transformation bzw. blockweiser Driftkorrektur nehmen die mittleren Koordinatenfehler der Blockpunkte in der Lage um 60%, in der Höhe um etwa 40% zu. Das aus operationellen Gründen schon favorisierte Modell b mit 2 Querstreifen schneidet dabei unter allen Szenarios vergleichsweise am günstigsten ab, trotz streifenweisen Ansatzes der Driftparameter. Die Zunahme der mittleren Fehler ge-

Fall:	c (4 PP)
	a (4 PP + 2 Ketten von Höhen-PP)
	b (4 PP + 4 HPP + 2 Querstreifen)
Wenn	
$\sigma_{pp} = \sigma_0, \sigma_{pp} \leq \sigma_0 = \sigma_0 \cdot S, \sigma_{GPS} \leq \sigma_0 = \sigma_0 \cdot S$ (S = Bildmassstabszahl)	
dann	
$\mu_{x,y} \leq 1.0 \sigma_0$	$\mu_z \leq 1.6 \sigma_0$ (c, ohne Driftparameter)
$1.0 \sigma_0$	$1.6 \sigma_0$ (a, ohne Driftparameter)
$1.7 \sigma_0$	$2.3 \sigma_0$ (c, Driftparameter per Block)
$1.7 \sigma_0$	$1.7 \sigma_0$ (a, Driftparameter per Block)
$2.1 \sigma_0$	$2.3 \sigma_0$ (a, Driftparameter per Streifen)
$1.5 \sigma_0$	$2.0 \sigma_0$ (b, Driftparameter per Streifen)
Blockgrösse: 6 × 21 Bilder	

Tab. 1: Genauigkeit ausgeglichener GPS-Bündelblöcke.

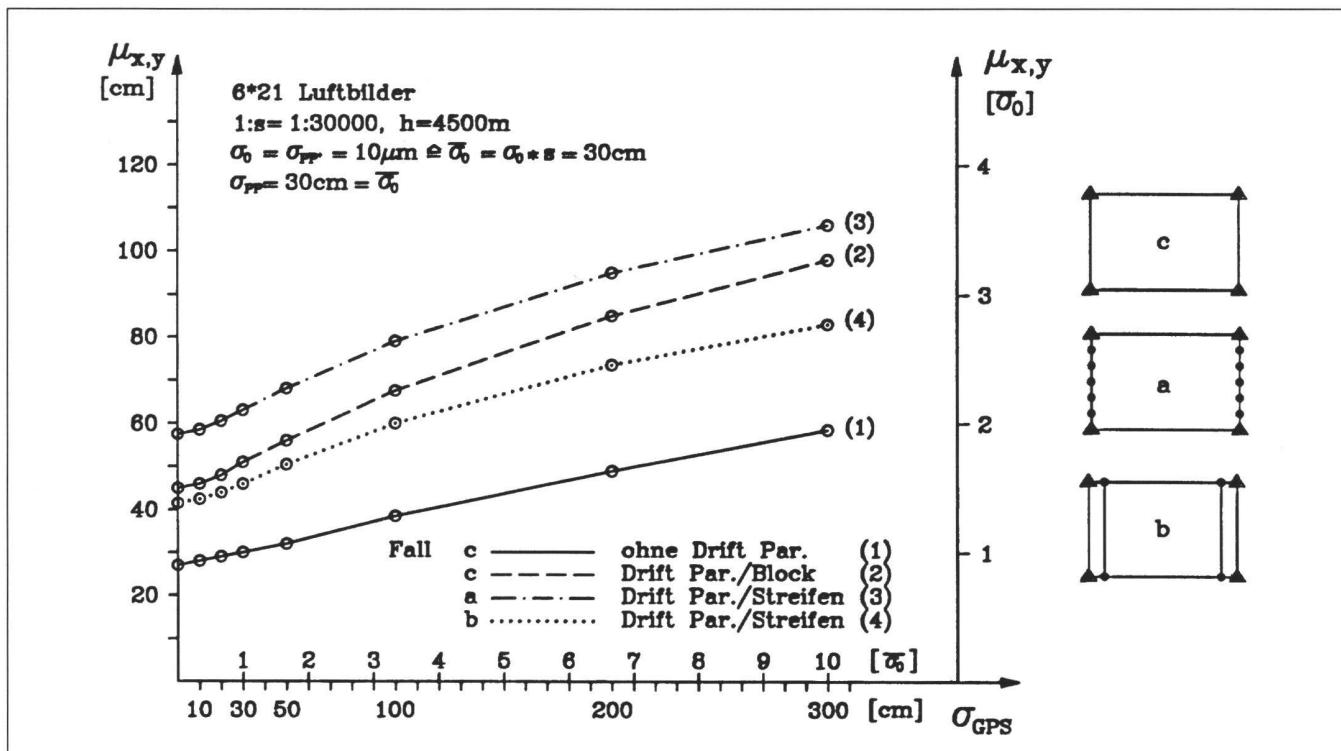


Abb. 2: Einfluss von GPS Kamera-Positionier-Genauigkeit (σ_{GPS}) und Driftparametern auf die Lagegenauigkeit ($\mu_{x,y}$) ausgeglichener Blöcke (kombinierte Bündelblockausgleichung).

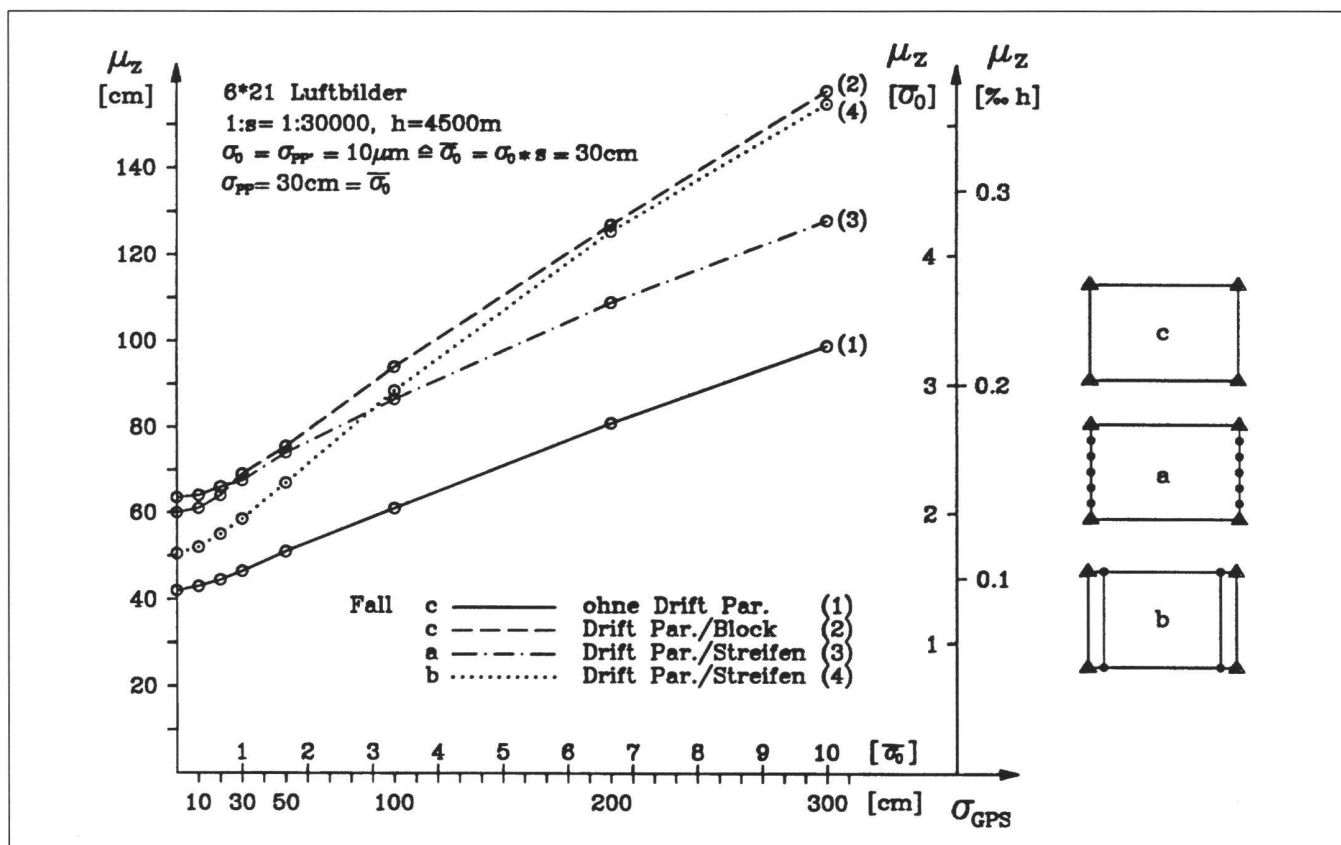


Abb. 3: Einfluss von GPS Kamera-Positionier-Genauigkeit (σ_{GPS}) und Driftparametern auf die Höhengengenauigkeit (μ_z) ausgeglichener Blöcke (kombinierte Bündelblockausgleichung).

genüber dem idealen Fall c (1) beträgt im Fall fehlerfreier Passpunkt- und GPS-Daten in der Lage rund 40% ($\mu_{x,y} \rightarrow 1.4 \sigma_0$), in der Höhe nur 20% ($\mu_z \rightarrow 1.7 \sigma_0$).

Wie die Kurven in Abbildung 2 und 3 zeigen, ändert sich an diesen Genauigkeitszusammenhängen mit zunehmender GPS Ungenauigkeit nur wenig, solange die

Standard-Abweichung σ_{GPS} im Bereich der photogrammetrischen Messgenauigkeit (σ_0) bleibt. Dasselbe gilt für die Ungenauigkeit der Passpunktkoordinaten. Für

die normierenden Annahmen $\sigma_{pp} \leq \bar{\sigma}_0$ und $\sigma_{GPS} \leq \bar{\sigma}_0$ ergeben sich so sehr einfache und übersichtliche Verhältnisse, die in Tabelle 1 zusammengestellt sind. Da sich alle Genauigkeitsangaben auf die photogrammetrische Messgenauigkeit (σ_0 bzw. $\bar{\sigma}_0$) beziehen, gelten die Zusammenhänge für praktisch beliebige Bildmassstäbe, sowie innerhalb von 5–10% Abweichung auch für beliebige Blockgrößen, wobei kleinere Blöcke ungenauer ausfallen. Es sei aber daran erinnert, dass es sich um idealisierte theoretische Ergebnisse handelt, die jedoch ohne weiteres als Grundlage für Projektplanungen dienen können. Der Inhalt der Tabelle 1 (und entsprechend auch Abb. 2 und 3) sei durch 2 Beispiele kurz erläutert.

Mit dem Bildmassstab 1:50 000 und $\sigma_0 = 10 \mu\text{m}$ ($\triangleq \bar{\sigma}_0 = 50 \text{ cm}$), $\sigma_{pp} \leq 50 \text{ cm}$, $\sigma_{GPS} \leq 50 \text{ cm}$ sind folgende mittlere Koordinatenfehler im ausgeglichenen Block zu erwarten:

- Fall c (Driftparameter blockweise) $\rightarrow \mu_{x,y} \leq 85 \text{ cm}$, $\mu_z \leq 115 \text{ cm}$
- Fall b (Querstreifen, Parameter streifenweise) $\rightarrow \mu_{x,y} \leq 75 \text{ cm}$, $\mu_z \leq 100 \text{ cm}$.

Für den Bildmassstab 1:10 000 und $\sigma_0 = 7 \mu\text{m}$ ($\triangleq \bar{\sigma}_0 = 7 \text{ cm}$), $\sigma_{pp} \leq 7 \text{ cm}$, $\sigma_{GPS} \leq 7 \text{ cm}$ würde entsprechend gelten:

- Fall c (Driftparameter blockweise) $\rightarrow \mu_{x,y} \leq 12 \text{ cm}$, $\mu_z \leq 16 \text{ cm}$
- Fall b (Querstreifen, Parameter streifenweise) $\rightarrow \mu_{x,y} \leq 10 \text{ cm}$, $\mu_z \leq 14 \text{ cm}$.

Der weitere Verlauf der Kurven in Abbildung 2 und 3 zeigt, dass mit zunehmender Ungenauigkeit der GPS Kamera Positionierung die mittleren Fehler der ausgeglichenen Blockpunkte zunehmen. Es fällt jedoch auf, dass die Zunahme deutlich langsamer erfolgt als der Anstieg von σ_{GPS} , die Blöcke also nicht sehr empfindlich auf ungenauere GPS-Daten reagieren. Daraus kann der Schluss gezogen werden, dass vor allem für die Aerotriangulation in mittleren und kleinen Bildmassstäben (d.h. für Kartiermassstäbe $\leq 1:10\,000$) die erforderliche GPS Genauigkeit nur etwa 1 m oder darüber zu betragen braucht, dass also keine sehr hohen Anforderungen gestellt werden.

Andererseits ist eindeutig nachgewiesen, dass die GPS Positionierungsgenauigkeit auch bei längeren Flügen bei oder besser als 10 cm liegt ($\sigma_{GPS} \leq 10 \text{ cm}$). Damit sind die Vorteile der GPS-gestützten Aerotriangulation mit der entsprechenden drastischen Reduktion der konventionell erforderlichen Passpunkte auch im Bereich grossmassstäbiger Kartierungen wirksam. Es kann somit auf Grund der theoretischen und empirischen Untersuchungen allgemein festgestellt werden, dass die GPS Kamera Positionierung für Aerotriangulationen über den ganzen Massstabs-

bereich üblicher Luftbildkartierungen, d.h. von 1:1000 bis 1:100 000, vorteilhaft angewendet werden kann.

4.2 Empirische Ergebnisse

Die theoretischen Genauigkeitseigenschaften bedürfen einer experimentellen Überprüfung und Verifizierung darüber, ob sie im statistischen Sinne als hinreichend realistische Abschätzungen der tatsächlichen Genauigkeit realer Blöcke gelten können. Leider gibt es bisher nur wenige Beispiele von Testblöcken, deren Genauigkeit anhand von Vergleichspunkten unabhängig überprüft worden ist.

Als repräsentatives Beispiel werden hier die 2 Blockausgleichungen des Versuchs Glandorf (1991) aufgeführt, die sich insbesondere auf das Szenario b (4 Passpunkte, 2 Querstreifen) beziehen und bei denen streifenweise Driftparameter angesetzt wurden (s. Friess 1992). Bei der Befliegung des 6 km x 8 km grossen Testgebiets Glandorf (bei Osnabrück) durch die Firma Hansa Luftbild wurde gemäss den Vorschlägen des Abschnitts 2.2 verfahren, insbesondere kein GPS Standlauf vor dem Start für eine Anfangslösung der Phasenvieldeutigkeiten durchgeführt.

In den Kurvenflügen traten auch erhebliche Signalabrisse auf. Die Befliegung mit einer Weitwinkel-Kammer im Bildmassstab 1:8000 ($h = 1200 \text{ m}$) überdeckte den Block 2-fach, mit 70 Aufnahmen in 5 N-S Streifen und mit 70 Aufnahmen in 7 O-W Streifen. Für die GPS Kamera Positionierung wurden 2 Ashtech L XII Empfänger benutzt, mit denen die Phasen der L1 Trägerwellen und die C/A-Code Pseudo-Ranges mit der Messrate von 0,5 sec. gemessen wurden. Der stationäre Empfänger war im Messgebiet aufgestellt. Die kombinierte Blockausgleichung der beiden Befliegungen erfolgte getrennt, wobei jeweils 2 Querstreifen von der anderen Befliegung herangezogen wurden. Somit umfasste der Block I 5 parallele N-S Streifen + 2 O-W Querstreifen mit insgesamt 90 Aufnahmen und Block II 7 parallele O-W Streifen + 2 N-S Querstreifen mit insgesamt 98 Aufnahmen. Beide Blöcke wurden mit der Bündelmethode trianguliert (Punktübertragung mit dem Zeiss PM 1 und Bildkoordinatenmessung mit dem Monokomparator Zeiss PK 1). Die kombinierten Blockausgleichungen benutzten jeweils nur 4 (signalisierte) Passpunkte in den Blockecken und setzten für jeden Bildstreifen unabhängige GPS Driftparameter an (Fall b).

Aus der Ausgleichung ergab sich eine Genauigkeit der Bildkoordinaten von $\sigma_0 = 6,3 \mu\text{m}$. Zur unabhängigen Überprüfung der Ergebnisse der Blockausgleichungen standen 11 signalisierte XYZ-Vergleichspunkte und zusätzlich 20 signalisierte Höhenvergleichspunkte zur Verfügung. Durch Vergleich der aus der Blockausgleichung erhaltenen Koordinaten dieser Ver-

gleichspunkte mit den geodätischen Sollwerten ergaben sich mittlere Differenzen von 6,3 cm in X, Y und von 8,5 cm in Z für Block I bzw. von 7,8 cm und 10,3 cm für Block II. Diese Werte repräsentieren in erster Näherung die empirische Abschätzung der tatsächlichen Blockgenauigkeit, die mit der theoretischen Erwartung verglichen werden kann. Nach den Pauschalangaben der Tabelle 1 wäre bei beiden Blöcken eine theoretische Genauigkeit von 7,6 cm in den Lagekoordinaten und von 10,1 cm in der Höhe zu erwarten. Nach einer detaillierteren theoretischen Studie, die sich direkt auf die Vergleichspunkte bezieht, liegt die theoretische Erwartung bei 4,4 cm in der Lage und bei 9,5 cm in der Höhe.

Die GPS Befliegung Glandorf kann als repräsentatives Beispiel dienen, das inzwischen durch verschiedene praktische Projekte bestätigt worden ist, dass die GPS-gestützte Aerotriangulation ein einsatzfähiges Stadium für routinemässige Anwendung erreicht hat. Insbesondere haben sich die operationellen Vereinfachungen bewährt, bei denen zunächst systematische Drift Fehler in Kauf genommen werden, um dann nachträglich bei der kombinierten Blockausgleichung eliminiert zu werden. Die empirischen Genauigkeitsergebnisse bestätigen immerhin, dass die theoretischen Vorhersagen sehr realistisch sind und zumindest für Projektplanung Gültigkeit beanspruchen können.

5. Präzisions-Aerotriangulation und Katasterphotogrammetrie

Die bisherigen Darlegungen zur GPS-gestützten Aerotriangulation haben zu der Aussage der allgemeinen und wirtschaftlichen Anwendbarkeit des Verfahrens über den ganzen Massstabsbereich konventioneller Luftbildkartierungen geführt. Als obere Grenze wurde dabei der Kartiermassstab 1:1000 angeführt, dem eine Genauigkeit der Aerotriangulation in Lage und Höhe von etwa 10 cm entspricht. Bis zu diesen Genauigkeitsanforderungen ist die GPS Kamera Positionierung genau genug und unproblematisch anwendbar.

Nun gibt es aber ausserhalb der Kartierung die Anwendung der analytischen Aerotriangulation für die hochgenaue numerische Punktbestimmung. Dabei wird mit signalisierten Punkten gearbeitet, und es werden grosse Bildmassstäbe (um 1:4000) verwendet, um auf Lagegenauigkeiten von 1–2 cm zu kommen. Mit hochgenauen Messgeräten und Bündelblockausgleichung mit zusätzlichen Parametern (für systematische Bildfehler) werden in der Praxis dabei regelmässig Bildkoordinaten Genauigkeiten von $\sigma_0 = 3 \mu\text{m}$ erreicht. Derartige Blöcke sind in der Regel gut mit genauen Lagepasspunkten abgesichert (Randbesetzung und evtl. zusätzli-

che Punkte) und enthalten sog. starke Verknüpfungen, d.h. wesentlich mehr Verknüpfungspunkte als minimal für die Aerotriangulation notwendig wären. Die theoretische Lagegenauigkeit liegt dann für Einfach-Blöcke (20% Querüberdeckung) bei $\mu_{x,y} = 1.2 \sigma_0$, für Blöcke mit 60% Querüberdeckung bei $\mu_{x,y} = 0.8 \sigma_0$ (s. Ackermann, Stark 1985). Mit dem Bildmassstab 1:4000 und $\sigma_0 = 3 \mu\text{m}$ sind also Lagegenauigkeiten von 1,4 cm bzw. 1,0 cm zu erwarten. Derartige Ergebnisse werden in der Praxis auch tatsächlich erreicht, wie verschiedentlich nachgewiesen worden ist.

Dieser Fall der hochgenauen Lagepunktbestimmung in der Anwendung bei der photogrammetrischen Netzverdichtung oder der Katasterphotogrammetrie ist aus den bisherigen GPS Betrachtungen aus 2 Gründen ausgeklammert geblieben: Einmal nähert man sich wirklich der Genauigkeitsgrenze der kinematischen GPS-Positionierung. Zum anderen ist dieser Grenzbereich bisher nicht untersucht worden. Immerhin müssten aber unter den genannten Verhältnissen nach den allgemeinen Ergebnissen der Abbildung 2 z.B. mit einer GPS-Positionierungsgenauigkeit von $\sigma_{\text{GPS}} = 5 \text{ cm}$ und dem Bildmassstab 1:4000 bei der Blockausgleichung Genauigkeiten in den Lagekoordinaten von 3 cm und in der Höhe von 10 cm erreicht werden, selbst wenn nur die Minimalanforderung von 4 Passpunkten und 2 Querstreifen verwendet wird. Nun wird aber bei der Anwendung in der Katasterphotogrammetrie die extreme Reduktion der Passpunkte auf das Minimum von 4 Punkten in der Regel nicht sehr dringend sein. Es ist daher zu erwarten, dass die photogrammetrische Katastervermessung mit Einbeziehung der GPS Kamera Positionierung und im Zusammenwirken mit einer gewissen Anzahl von Passpunkten ein auch bei extremen Genauigkeitsanforderungen wirtschaftlich und operationell vorteilhaftes Verfahren bilden kann. Tatsächlich haben einige neueste Simulationen diese Erwartung bestätigt. So ergab sich z.B. bei dem Bildmassstab 1:4000 und der photogrammetrischen Bildkoordinatengenauigkeit von $\sigma_0 = 3 \mu\text{m}$ als Ergebnis der kombinierten Blockausgleichung theoretisch eine Lagegenauigkeit von 1,6 cm und eine Höhengenaugkeit für flaches Gelände von 3 cm, jeweils für signalisierte Punkte. Dabei wurden 8 Passpunkte und 2 Querstreifen benutzt, und die Genauigkeit der GPS Kamera Positionierung war mit $\sigma_{\text{GPS}} = 5,4 \text{ cm}$ ($= 4,5 \sigma_0$), die der terrestrischen Passpunktkoordinaten mit 1,8 cm ($= 1,5 \sigma_0$) angenommen, wobei vor allem letztere Annahme einen empfindlichen Einfluss auf das Endergebnis hat. Man kann also mit gutem Grund erwarten, dass die GPS Kamera Positionierung auch im Grenzbereich der hochgenauen Kataster-Photogrammetrie sehr wirksam ist und wirt-

schaftlich eingesetzt werden kann. Allerdings bedarf dieser Komplex der grossmassstäbigen Präzisions-Aerotriangulation mit GPS weiterer theoretischer und experimenteller Untersuchungen.

Bei der Katasterphotogrammetrie spielen die Höhen i.a. eine geringe Rolle und können unabhängig betrachtet werden. Lediglich bei grossen Höhenunterschieden im Gelände beeinflussen sich Lage- und Höhenorientierung gegenseitig und bedürfen gemeinsamer Planung. Es ist aber abzu-sehen, dass die GPS-Stützung der Katasterblöcke bezüglich der Höhen nach dem Szenario b (Abb. 1) auch bei gebirgigem Gelände ausreichend ist.

Im Zusammenhang mit der numerischen Katasterphotogrammetrie ist es hier am Schluss vielleicht angebracht, einige Gesichtspunkte zur Weiterentwicklung anzusprechen. Die photogrammetrische Durchführung grösserer Katasterneuvermessungen mit signalisierten Punkten ist von der Genauigkeit her gesehen unproblematisch und in vielen Fällen auch gegenüber der tachymetrischen Aufnahme wirtschaftlich konkurrenzfähig. Je nach den Verhältnissen können Lagegenauigkeiten von 1,5–3 cm zuverlässig erreicht werden.

Ein sehr viel komplexeres und im Grunde noch ungelöstes Problem bildet dagegen die Anfängerung neuer an alte Katastervermessungen, die Integration alter Punktfelder bzw. überhaupt die Homogenisierung alter Katasterbestände. Punktfelder des Katasters haben häufig eine inhomogene Geschichte, ungleichmässige Genauigkeit, sind unzureichend gegenseitig eingebunden und unterliegen oft erheblichen Netzspannungen. An Nahtstellen zu Neuvermessungen zeigen sich in der Regel grosse Diskrepanzen. Diese Problematik ist zur Genüge bekannt und gilt im übrigen für terrestrisch-tachymetrische wie für photogrammetrische Katastervermessungen in gleicher Weise.

Es wäre an der Zeit, das Thema der Homogenisierung von Kataster-Punktfeldern bzw. der Einbindung alter und neuer Messungen unter den heute gegebenen technischen Möglichkeiten neu und grundsätzlich aufzugreifen. Es gibt dafür bereits konzeptionelle Ansätze auf der Basis der genauen photogrammetrischen Punktbestimmung, die für die Einbindung alter Punktfelder besonders günstige Voraussetzungen bietet. So wird in Dörschel (1992) über sehr positive Erfahrungen in Stadtgebieten berichtet. Durch Signalisierung einer hinreichenden Zahl alter Punkte und deren photogrammetrischer Neumessung können alte Punktfelder identifiziert und durch entsprechende Transformationen flächenhaft in ein homogenes Gesamtsystem gebracht werden. Ein noch weiter gehender Vorschlag wäre, alle alten Punkte in die photogrammetrische Blockausgleichung einzubeziehen

und dabei durch lokale Korrelationen dafür zu sorgen, dass auch die nicht signalisierten und damit photogrammetrisch nicht neu gemessenen Punkte durchgreifend und homogen mittransformiert werden. Wenn durch die Signalisierung einer hinreichend grossen Anzahl von Punkten der Zusammenhang mit der photogrammetrischen Neuvermessung gewährleistet ist, kann auf diese Weise die homogene Anfängerung auch grosser Punktgruppen durchgreifend algorithmisch erfolgen, wobei eine interaktive Nachbearbeitung noch weitere Verfeinerungen anbringen kann. Eine derartige prinzipielle Weiterentwicklung der Katasterphotogrammetrie stellt nach Auffassung des Verfassers eine wichtige und eigenständige Aufgabe dar, die zunächst unabhängig von GPS ist. Die Einbeziehung sowohl terrestrischer als auch photogrammetrischer GPS-Messungen ist aber geeignet, die notwendige Genauigkeit und Flexibilität der Verfahren zu gewährleisten, sowie ihre Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit zu steigern.

Literatur:

- F. Ackermann (1992): Operational Rules and Accuracy Models for GPS-Aerotriangulation; Invited Paper ISPRS Comm. III, Congress Washington D.C., 1992.
- F. Ackermann und E. Stark (1985): Zur Lagegenauigkeit photogrammetrischer Katastervermessungen; Mitteilungen des DVW, Landesverein Baden-Württemberg e.V.; 2/1985, S. 68–83.
- R. Dörschel (1992): Der Aufbau genauer Festpunktfelder in Städten; AVN 3/1992, S. 113–121.
- P. Friess (1990): Kinematische Positionsbestimmung für die Aerotriangulation mit dem NAVSTAR Global Positioning System; DGK Reihe C, Heft Nr. 359, 145 S.
- P. Friess (1992): GPS-supported Aerial Triangulation – Empirical Results; Proceedings 2nd International Workshop High Precision Navigation Stuttgart/Freudenstadt, 1991 (im Druck).

Adresse des Verfassers:
Prof. F. Ackermann
Universität Stuttgart
Institut für Photogrammetrie
Keplerstrasse 11
D-7000 Stuttgart 1