

# MÖGLICHKEITEN DER ERZEUGUNG STÄDTISCHER OBERFLÄCHENMODELLE MIT INTERFEROMETRISCHER SAR-FERNERKUNDUNG

Michael Schmitt, Uwe Stilla

**Zusammenfassung:** In den letzten Jahren ist die Nachfrage nach der Bereitstellung von zwei- und dreidimensionalen Geodaten für Geoinformationssysteme (GIS) ständig gestiegen. Dabei geht es einerseits um die Aufnahmen zur Ersterfassung von Raster- oder Vektordaten, andererseits auch um die ständige Aktualisierung und Fortführung der Datengrundlage. Dies gilt insbesondere für Bereiche großer Dynamik, wie den sich ständig verändernden Stadtgebieten unserer Welt. Schon seit vielen Jahren wird die SAR-Interferometrie dazu verwendet, die dreidimensionale Topographie der Erdoberfläche unabhängig von Wolkenbedeckung und Tageszeit zu erfassen. Sie gilt deshalb als wertvolles Werkzeug für die schnelle Geodatenakquise vor allem in zeitkritischen Szenarien, z. B. bei der zeitnahen Kartierung von Katastropheneignissen. Die seitwärtsblickende SAR-Abbildungsgeometrie führt jedoch insbesondere in urbanen Gebieten, wo typischerweise viele erhabene Objekte (z. B. Gebäude oder Bäume) vorhanden sind, zu störenden Effekten, die eine Gewinnung von 3D-Informationen auf klassischem Wege verhindern und bei der Rekonstruktion von städtischer Topographie zu Ungenauigkeiten, Fehlern und Datenlücken führen. Mit dem Ziel, diese Nachteile aufzulösen, werden in diesem Beitrag innovative Möglichkeiten zur Erzeugung städtischer Oberflächenmodelle unter Verwendung von Mehrfachbeobachtungen vorgestellt. Diese ermöglichen eine flächendeckende Rekonstruktion urbaner Oberflächenmodelle mittels flugzeuggetragener interferometrischer SAR-Fernerkundung mit Genauigkeiten bis in den Submeterbereich.

**Schlüsselwörter:** Geodatenerfassung, SAR, InSAR, DOM, 3D-Punktwolken, urbane Gebiete

## POSSIBILITIES FOR THE GENERATION OF URBAN SURFACE MODELS BY INTERFEROMETRIC SAR REMOTE SENSING

**Abstract:** In recent years, the demand for the provision of two- and three-dimensional geodata for geoinformation systems (GIS) has constantly grown. On the one hand, this impacts the first-time acquisition of raster or vector data, on the other hand, it means a permanent updating of the data basis. In particular, this holds for high-dynamic areas, such as the ever-changing urban areas of our planet. SAR interferometry has been used to derive three-dimensional topographic information of the Earth's surface independently of cloud coverage or daytime for many years. This has made it a valuable tool for rapid geodata acquisition, especially in time-critical scenarios such as rapid mapping of disaster situations. Particularly in urban areas, where typically many elevated objects (e. g. buildings or trees) are present, the side-looking SAR imaging geometry, however, leads to disturbing effects that prevent the generation of 3D information by conventional means and that cause inaccuracies, errors and data gaps during the reconstruction of urban topography. With the goal in mind to eliminate these disadvantages innovative InSAR processing strategies are proposed in this paper, which enable a comprehensive reconstruction of urban surface models by airborne interferometric SAR remote sensing with accuracies down to the submeter range.

**Keywords:** Geodata acquisition, SAR, InSAR, DSM, 3D point clouds, urban areas

### Autoren

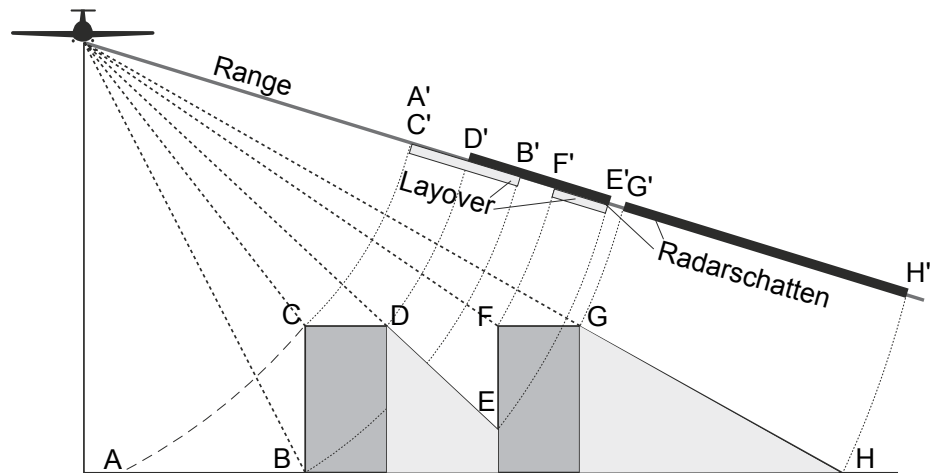
Dr.-Ing. Michael Schmitt  
Technische Universität München  
Helmholtz-Nachwuchsgruppe SiPEO  
Arcisstr. 21  
D-80333 München  
E: m.schmitt@tum.de

Prof. Dr.-Ing. Uwe Stilla  
Technische Universität München  
Fachgebiet Photogrammetrie und Fernerkundung  
Arcisstr. 21  
D-80333 München  
E: stilla@tum.de

## 1 MOTIVATION

In den letzten Jahren ist die Nachfrage nach der Bereitstellung von zwei- und dreidimensionalen Geodaten für Geoinformationssysteme (GIS) ständig gestiegen. Dabei geht es einerseits um Aufnahmen zur Ersterfassung von Raster- oder Vektordaten, andererseits auch um ständige Aktualisierung und Fortführung der Datengrundlage. Dies gilt insbesondere für Bereiche großer Dynamik, wie den sich ständig verändernden Stadtgebieten unserer Welt. Grundsätzlich kann die Geodatenerfassung *in situ*, also mithilfe terrestrischer Vermessungs- und Kartierungsmethoden geschehen. Oft bietet sich jedoch die flugzeug- oder satellitengestützte Fernerkundung als Methode der Wahl an, da diese in der Regel eine flächendeckende Datengewinnung auch ausgedehnter Bereiche in kurzer Zeit ermöglicht. Über die Ableitung von 3D-Strukturen städtischer Gebiete, vor allem mithilfe von Luftbildern oder Laserscannern, finden sich viele Arbeiten in der Literatur (Mayer 1999, Brenner 2005, Haala & Kada 2010). Die vorgestellten Methoden reichen von manueller Rekonstruktion über semi-automatische Analysen bis hin zur vollautomatischen Generierung von 3D-Stadtmodellen. Neben Vektordaten, wie sie in semantischen 3D-Stadtmodellen verwendet werden, und beispielsweise mithilfe des CityGML-Standards (Kolbe et al. 2005) beschrieben werden können, sind häufig aber auch rasterbasierte Geodaten von Interesse, z. B. in Form der oft benötigten Digitalen Gelände- bzw. Oberflächenmodelle (DGM, DOM). Aber auch unstrukturierte 3D-Punktwolken finden ihre Anwendung, z. B. in Bereichen der Vegetation oder bei der vollautomatischen, dreidimensionalen Veränderungsdetektion, die ohne aufwendige Vorprozessierungsschritte auskommt (Hebel & Stilla 2013). Bei der Erfassung dieser 3D-Punktwolken bestimmen gegenwärtig ebenfalls die klassische Photogrammetrie sowie das (flugzeuggetragene) Laserscanning den Stand der Technik, wie bereits Kraus (2005) festgestellt hat.

In den vergangenen Jahrzehnten hat sich allerdings auch die Radarfernerkundung zu einem wertvollen Werkzeug in der Geodatenerfassung entwickelt, da die sogenannte SAR-Bildgebung einige konkrete Vorteile gegenüber optischen und Infrarot-Sensoren aufweist: Zum einen sind Radarsensoren aktive Sensoren, die ihre eigene



**Abbildung 1:** Layover und Radarschatten in einer städtischen Umgebung. Die Signalantwort des ersten Gebäudes vermischt sich mit der Antwort des Bodens davor, während das Rückstreuungssignal des zweiten Gebäudes mit dem Schatten des ersten Gebäudes zusammenfällt.

Beleuchtungsquelle zur Verfügung stellen und deshalb unabhängig von Tages- oder Nachtzeit eingesetzt werden können. Da Mikrowellen außerdem deutlich längere Wellenlängen als das sichtbare Licht aufweisen, können SAR-Bilder auch bei ungünstigen Wetterbedingungen, z. B. bei Wolkenbedeckung oder Regen, erzeugt werden. Da die neuesten Sensoren mittlerweile Auflösungen im Submeter- und sogar Dezimeterbereich bereitstellen, ist nun auch eine detaillierte Analyse von urbanen Objekten wie Straßen (Stilla et al. 2007), Gebäuden (Sörgel 2010) oder einzelnen Bäumen (Stilla et al. 2014) im Rahmen der Radarfernerkundung möglich. Leider ist jedoch die Anwendung von SAR bei städtischen Gebieten eine schwierige, nicht-triviale Aufgabe: Wegen des seitwärtsblickenden Abbildungsprinzips treten störende Geometrie-Effekte wie Layover und Radarschatten auf. Während Schatten zu Bildbereichen ohne brauchbare Informationen führt, bedingt Layover eine Überlagerung mehrerer Streuer unterschiedlicher Höhe in einer einzelnen Auflösungszelle.

Diese Nachteile können mit fortgeschrittenen InSAR-Techniken, die sich geschickt das Prinzip von Mehrfachbeobachtungen zunutze machen, aufgelöst werden. Dieser Beitrag stellt zwei solcher Techniken vor. Sie ermöglichen einerseits die Trennung überlagerter Streuer durch simultane Beobachtung mehrerer Antennen, mit denen sich dann mehrere Basislinien aufspannen lassen. Andererseits ermöglichen sie die Fül-

lung von durch Radarschatten verursachten Informationslücken mithilfe von Beobachtungen unterschiedlicher Blickwinkel, wie es im Rahmen der automatischen Erkennung von Gebäuden z. B. schon von Thiele et al. (2007) diskutiert wurde.

Abschnitt 2 beschreibt noch einmal kurz die typischen Effekte der SAR-Abbildungsgeometrie. Abschnitt 3 stellt zwei Strategien zur flächendeckenden Oberflächenrekonstruktion in städtischen Gebieten mittels Multi-Aspekt Multi-Baseline SAR vor, deren experimentelle Ergebnisse in Abschnitt 4 zusammengefasst werden. Abschnitt 5 beinhaltet schließlich Zusammenfassung und Ausblick.

## 2 GEOMETRISCHE ABBILDUNGSEFFEKTE

Wie bei jedem bildgebenden Verfahren wird auch in der SAR-Fernerkundung der die Welt beschreibende 3D-Raum in eine zweidimensionale Bildebene abgebildet. Im Fall von SAR ist dies die Azimut-Range-Ebene. Durch die seitwärtsblickende Sensorgeometrie und die Tatsache, dass es sich bei Radar um Entfernungsmessende Sensorik handelt, treten bei der Beleuchtung erhabener Objekte (z. B. Berge, Bäume oder Gebäude) die Effekte Layover und Radarschatten auf (Abbildung 1).

Für die Auswertung der interferometrischen Phase im Rahmen der SAR-Interferometrie (siehe Kasten) hat dies zwei gravierende Auswirkungen: Während Layover-Pixel die Phase von zwei Streukomponenten

unterschiedlicher Höhen in aufsummierter, nicht ohne Weiteres trennbarer Form beinhalten, enthalten Schattenpixel, von thermischem Rauschen abgesehen, keine nutzbaren Informationen. Die klassische SAR-Interferometrie stößt hier also an ihre Grenzen, und ausgefeiltere, auf Mehrfachbeobachtungen basierende Prozessierungsstrategien sind gefragt. Dieser Beitrag zeigt, wie sie durch Nutzung innovativer Prozessierungsstrategien unter Verwendung mehrerer Basislinien und Blickrichtungen doch dazu verwendet werden kann, flächendeckende 3D-Geodaten von urbanen Szenen zu generieren.

### 3 REKONSTRUKTION URBANER OBERFLÄCHENMODELLE UNTER VERWENDUNG VON SAR-INTERFEROMETRIE UND MEHRFACHBEOBACHTUNGEN

Im Folgenden sollen zwei Prozessierungsstrategien vorgestellt werden, mit denen es möglich ist, flächendeckende Oberflächenmodelle urbaner Gebiete unter Ausnutzung von Mehrfachbeobachtungen (Abbildung 2) zu erstellen. Die erste Strategie nutzt mehrere Basislinien in einem SAR-Tomographie-Ansatz, womit zuerst 3D-Punktwolken für Datensätze unterschiedlicher Blickrichtungen rekonstruiert werden. In einem zweiten Schritt werden diese georeferenzierten Punktwolken mehrerer Aspekte mithilfe einer Voxelraum-basierten Fusionsvorschrift zu einer einzigen Punktwolke zusammengeführt. Mehrfachbeobachtungen, nämlich mehrere Basislinien und mehrere Blickrichtungen, werden in diesem Beispiel nacheinander genutzt. Die zweite Strategie zielt demgegenüber auf eine simultane Fusion von Mehrfachbasislinien-Daten mehrerer Aspekte in einem einzigen Schritt, innerhalb eines geschlossenen Rahmens, ab und führt letztendlich zu einer 2,5D-Höhenkarte als Resultat. Beide Strategien werden kurz vorgestellt und in Kapitel 4 mithilfe flugzeuggetragener Testdaten in Bezug auf die erreichbaren Ergebnisse miteinander verglichen.

#### 3.1 DER 3D-ANSATZ: SCHRITTWEISE FUSION VON TOMOSAR-PUNKTWOLKEN

Als SAR-Tomographie (oder kurz: TomoSAR) bezeichnet man eine Erweiterung der klassischen SAR-Interferometrie unter Verwendung von mehr als zwei koregistrierten

## GRUNDLAGEN DER SAR-INTERFEROMETRIE

Das der Radarfernerkundung zugrunde liegende Prinzip basiert auf der Emission elektromagnetischer Wellen, die die Szene beleuchten, und dem darauffolgenden Messen des zurückgestreuten Echos, um mithilfe ausgeklügelter Signalverarbeitungsmethoden ein sogenanntes SAR-Bild zu erzeugen. Wie bei allen bildgebenden Verfahren findet auch bei der SAR-Fernerkundung eine Abbildung der dreidimensionalen Welt in ein zweidimensionales Bildkoordinatensystem statt. Um die verlorene dritte Dimension zu rekonstruieren, können die kohärenten SAR-Signale zweier koregistrierter Aufnahmen derselben Szene interferometrisch analysiert werden. Die SAR-Interferometrie (InSAR) ist seit mehr als zwei Jahrzehnten ein etabliertes Werkzeug zur flächendeckenden Vermessung der Landoberfläche (Bamler & Hartl 1998) – zumindest in nicht-urbanen Bereichen.

### DAS SAR-PRINZIP

In diesem Abschnitt wird kurz auf die wichtigsten Grundlagen des SAR-Prinzips eingegangen werden. Für genauere Informationen sei der Leser auf die zahlreichen etablierten Buchwerke zum Thema verwiesen, z. B. (Curlander & McDonough 1991, Cumming & Wong 2005).

Grundsätzlich handelt es sich bei Radar (Radio Detection and Ranging) um eine aktive Sensortechnologie, bei der die Szene mit elektromagnetischen Wellen beleuchtet wird und die zurückgestreuten Signale an der Empfängerantenne gemessen werden. Theoretisch kann dazu jedes beliebige Frequenzband genutzt werden, jedoch wird üblicherweise auf Frequenzen des Mikrowellenbereichs zurückgegriffen. Bildgebendes Radar ermöglicht eine zweidimensionale Abbildung der Erdoberfläche;

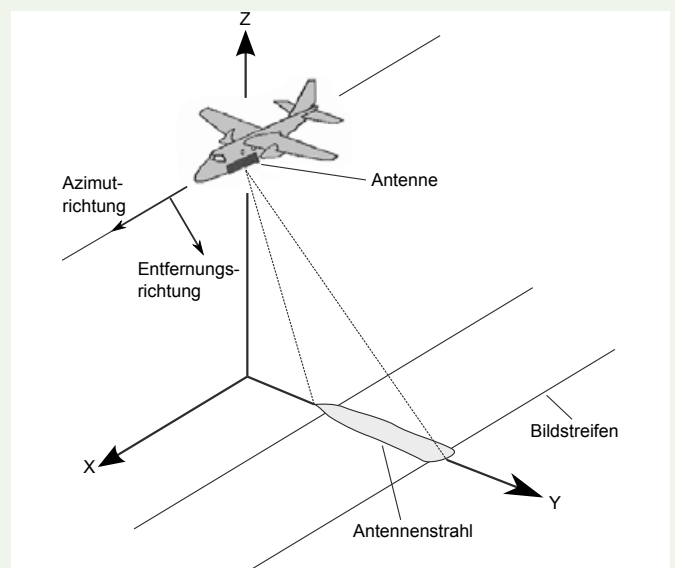


Abbildung A: Seitwärtsblickende SAR-Abbildungsgeometrie. Das Flugzeug fliegt in X-Richtung (Azimutrichtung) und bildet einen Streifen seitlich vom Flugpfad bzw. Nadir ab.

die klassische Konfiguration eines typischen seitwärtsblickenden, flugzeuggetragenen SAR-Systems ist in Abbildung A dargestellt.

Die Antennenachse ist üblicherweise orthogonal zum Geschwindigkeitsvektor des Flugzeugs ausgerichtet, sodass ein zweidimensionales Bildkoordinatensystem entsteht, das definiert wird von den beiden Achsen *Azimut (Az)*, korrespondierend zur Flugrichtung, sowie *Range (R)*, korrespondierend zur Entfernung des beleuchteten Objekts zum Sensor. Während die Entfernungsauflösung eines solchen SAR-Systems ausschließlich durch die Bandbreite des ausgesendeten Radarpulses definiert wird, und damit prinzipiell entfernungsunabhängig ist, wird die Auflösung in Azimut von der Länge der physischen Radarantenne limitiert und nimmt daher mit zunehmender Entfernung ab. Dem wird Abhilfe verschafft durch das Synthetik-Apertur-Prinzip: SAR-Sensoren nutzen eine möglichst kurze physische Antenne mit großer Strahlbreite. Während der Vorwärtsbewegung der Trägerplattform und durch eine kohärente Prozessierung der rückgestreuten Signale wird eine künstliche – *synthetische* – Antenne generiert. Die Länge dieser synthetischen Apertur hängt dann von der Gesamtbeleuchtungsdauer des jeweiligen Ziels ab. Da diese mit zunehmendem Abstand zum Ziel ebenfalls zunimmt, ist somit auch die Azimutauflösung eines SAR-Systems entfernungsunabhängig, was für Anwendungen in der Fernerkundung einen unschätzbaren Vorteil darstellt. Eine detaillierte Beschreibung der bei der SAR-Bildgebung notwendigen Signalverarbeitungsschritte findet sich in Cumming & Wong (2005). Für die folgenden Beschreibungen reicht es festzuhalten, dass die so entstehenden Bilder aus komplexwertigen Auflösungszellen (bzw. Pixeln) bestehen, die jeweils Amplitude und Phase des fokussierten Radarsignals beinhalten. Während die Amplitude die Reflektivität der Szene wiedergibt und von Rauigkeit, dielektrischen Eigenschaften und geometrischer Erscheinung der beleuchteten Oberflächen abhängt, beinhaltet die Phase Informationen über den Abstand des Ziels zum Sensor und kann deshalb für geometrische Analysen genutzt werden.

## SAR-INTERFEROMETRIE

Die Phase

$$\varphi = -\frac{2\pi}{\lambda}(R_1 + R_2) + \varphi_{scatt} \quad (1)$$

eines SAR-Pixels resultiert aus der Zweiwegedistanz  $R = R_1 + R_2$  zwischen Sensor und Ziel, sowie einem Anteil  $\varphi_{scatt}$ , der aus den Streueigenschaften des Ziels resultiert.  $\lambda$  bezeichnet dabei die Wellenlänge des verwendeten Signals. Bildet man nun die Phasendifferenz für jedes Pixel zweier koregistrierter SAR-Aufnahmen derselben Szene, so erhält man jeweils die sogenannte interferometrische Phase.

$$\phi = \Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = -\frac{2\pi}{\lambda}(R_{2,1} - R_{2,2}) = -\frac{2\pi}{\lambda}\Delta R \quad (2)$$

Diese interferometrische Phase hängt also vom Unterschied zwischen den beiden Sensor-Ziel-Entfernungen ab. Aus dieser Entfernungsdifferenz wiederum lässt sich die Höhe des Ziels über einer Referenzfläche  $\Delta h$  über den Zusammenhang

$$\Delta\phi = -\frac{2\pi B \cos(\theta - \alpha)}{\lambda R_1 \sin \theta} \Delta h \quad (3)$$

bestimmen. Dabei beschreibt  $\Delta\phi$  den um den Anteil der Bezugsfläche bereinigten Anteil der interferometrischen Phase. Die beteiligten Größen Basislinie  $B$ , Sensorblickwinkel  $\theta$ , Neigung der Basislinie  $\alpha$ , sowie Schrägentfernung  $R$ , werden in Abbildung B illustriert. Eine detaillierte Herleitung von (3) findet sich beispielsweise in (Schmitt 2014).

Obwohl diese klassische Herleitung der SAR-Interferometrie allein auf einer geometrischen Auswertung der Aufnahmesituation im Sinne einer Zwei-Bild-Stereogrammetrie basiert, lässt sich das grundsätzliche Prinzip leicht auf eine Konfiguration unter Verwendung von mehr als zwei Aufnahmen (und damit mehr als einer Basislinie) erweitern. Dabei werden nicht selten die statistischen Eigenschaften der SAR-Signale und deren zugehörige Kovarianzmatrizen ausgenutzt (Schmitt 2014).

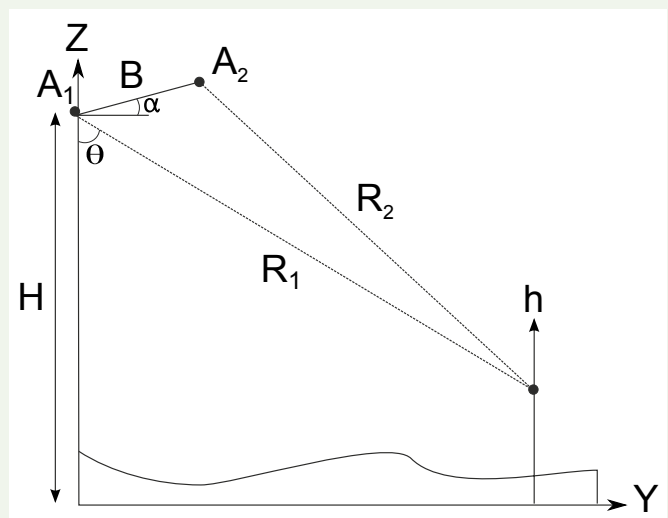
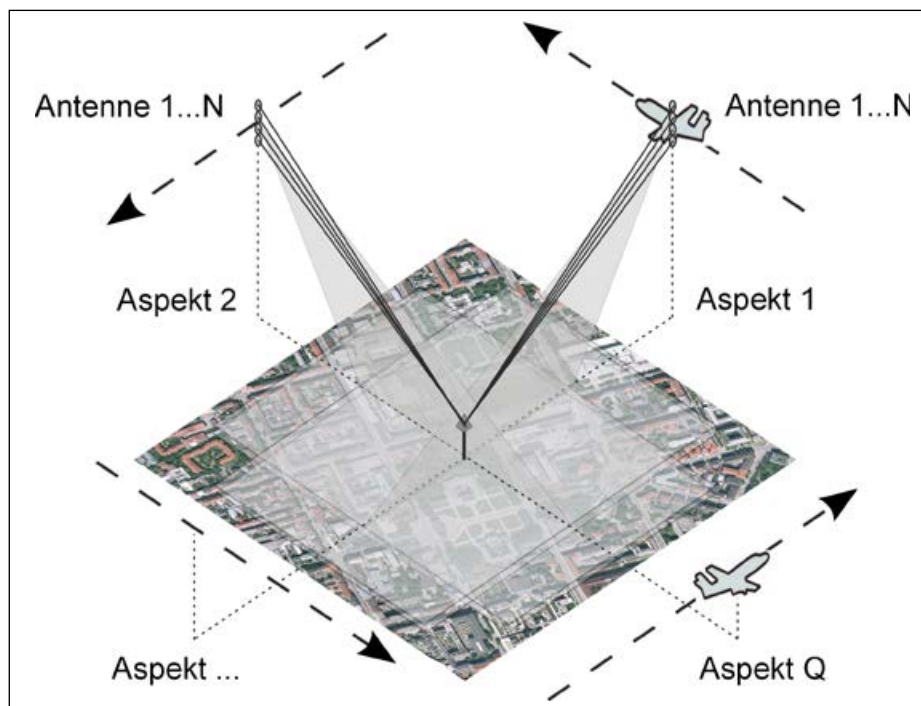


Abbildung B: Klassische Geometrie bei der SAR-Interferometrie

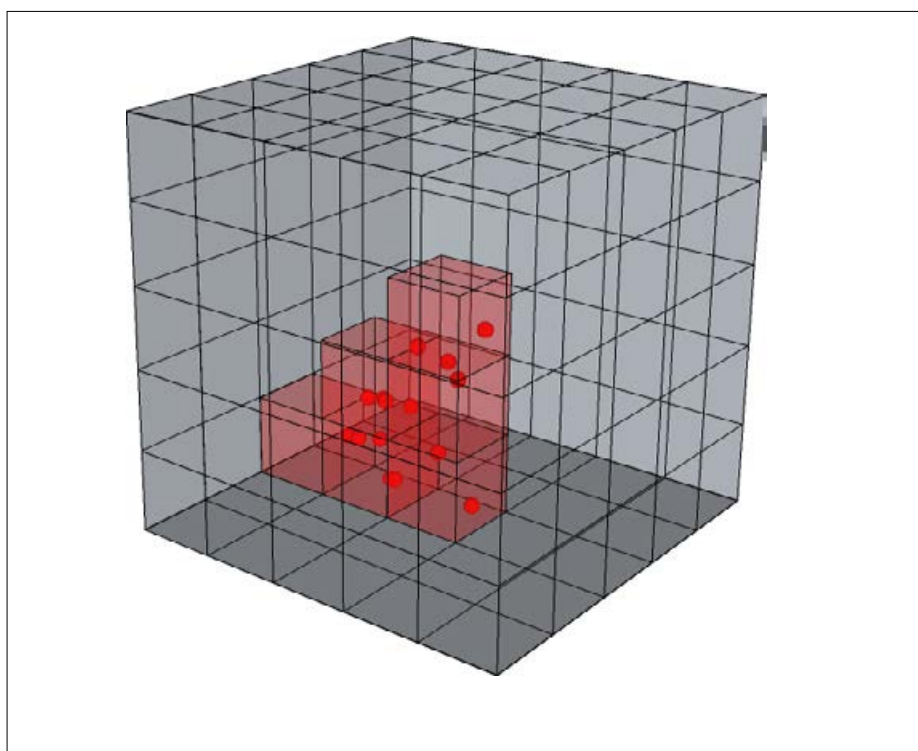


**Abbildung 2:** Das Prinzip von Mehrfachbeobachtungen in der flugzeuggetragenen SAR-Interferometrie. Die Szene wird von mehreren Blickrichtungen (Aspekten) beleuchtet, wobei pro Aspekt vier an Bord befindliche Empfängerantennen simultan vier leicht durch räumliche Basislinien versetzte Aufnahmen erzeugen.

Aufnahmen. Im Sinne der allgemeinen Sensorthorie entspricht eine derartige Konfiguration einer Anordnung mehrerer Antennen entlang einer dritten Radardimension, der sogenannten Elevation. Diese ist so definiert, dass sie senkrecht auf der jeweiligen Entfernungachse steht und zusammen mit dieser Entfernungachse und der Azimutachse (vgl. Kasten, Abbildung A) ein dreidimensionales kartesisches Koordinatensystem bildet. Liegen nun mehrere Aufnahmen bzw. Antennen mit räumlicher Trennung in Elevationsrichtung vor, so lässt sich das von der Azimutachse bekannte Synthetik-Apertur-Prinzip (vgl. Kasten) auf die Elevationsdimension übertragen (Reigber & Moreira 2000). Seit einigen Jahren macht man sich dies zunutze, um durch Spektreninversion auf die Beiträge einzelner Streuer zum resultierenden Signal rückzuschließen, also die zuvor gemischten Beiträge einzelner Streuer wieder voneinander zu trennen. Dadurch werden die negativen Auswirkungen des Layover-Effekts, nämlich die Rekonstruktion falscher Höhen aus Phasenmischungen, reduziert, und es können beispielsweise die bisher überlagerten Streuer einer Fassade und des davor liegenden Bodens (vgl. Abbildung 2) getrennt voneinander rekonstruiert werden. In der vorgestellten Prozessie-

rungsstrategie werden in einem ersten Schritt echte 3D-Punktwolken mithilfe einer TomoSAR-Auswertung, wie sie in Schmitt & Stilla (2014a) beschrieben wurde, erstellt. Da diese zunächst in der Azimut-Range-

Geometrie des SAR-Sensors vorliegen, müssen sie in einem zweiten Schritt mithilfe präziser Navigationsdaten des Messflugs geocodiert werden. Nachdem dies für Datensätze beliebig vieler Blickwinkel durchgeführt wurde, kann eine Voxelraum-basierte Fusion der Multi-Aspekt-Punktwolken vorgenommen werden, um eine konsistente 3D-Punktwolke der Szene zu erhalten. Der Fusionsprozess ist genauer beschrieben in Schmitt (2015). Nachdem die Punktwolken der einzelnen Blickrichtungen so bearbeitet wurden, dass sie in georeferenzierter und gegebenenfalls zusätzlich koregistrierter Form vorliegen, wird der 3D-Raum, der die Szene umgibt, in gleichmäßige Voxel unterteilt (siehe Abbildung 3). Danach findet eine Abfrage statt, die entsprechend der Zielsetzung der Fusion entworfen werden muss: Beispielsweise werden nur die Mittelwerte aller 3D-Punkte innerhalb eines Voxels zurückgegeben, wenn dieses entsprechende Voxel Punkte von mindestens zwei Aspekten enthält. Diese Fusionsstrategie führt einerseits zu einer deutlichen Ausdünnung der Punktwolke mit dem Effekt der Daten- und Speicherplatzreduktion, andererseits wird so die Qualität der finalen Punktwolke erhöht, weil z.B. nur in einzelnen Aspekten auftretende Ausreißer eliminiert werden.



**Abbildung 3:** Ein Voxelraum (graue Würfel) wird über einer 3D-Punktwolke (rote Punkte) aufgespannt. In diesem Beispiel sind jene Voxel rot markiert, die wenigstens einen 3D-Punkt enthalten.

Abbildung 4 fasst das Verfahren in einem einfachen Flussdiagramm zusammen. Der große Vorteil dieser Methode liegt darin, dass durch die TomoSAR-Prozessierung der vermeintliche Nachteil der SAR-Fernerkundung, nämlich die zum Layover-Effekt führende seitwärtsblickende Abbildungsgeometrie, in einen Vorteil verwandelt wird: Einerseits erlaubt diese Methodik die Trennung überlagerter Streuer, die bei klassischer Auswertung zu einer Fehlinterpretation der Phasenmessungen geführt hätten. Darüber hinaus können auf diese Weise aber sogar die Fassaden der Gebäude dreidimensional vermessen werden – und nicht nur deren Dächer. Es entsteht also ein echter 3D-Datensatz, der in Sachen Informationsgehalt über den von 2D+h- (bzw. 2,5D-) Datensätzen hinausgeht.

### 3.2 DER 2,5D-ANSATZ: SIMULTANE FUSION VON INSAR-DATEN MEHRERER ASPEKTE UND BASISLINIEN

Die zweite vorgestellte Rekonstruktionsstrategie verfolgt einen gänzlich anderen Ansatz: Hier beginnt das Verfahren mit einem vordefinierten Oberflächengitter in einem geeigneten Weltkoordinatensystem, z. B. UTM. Dieses Gitter wird dann sukzessive mittels invertierter Geocodierung und einem statistischen Fusionsalgorithmus mit Höhenschätzwerten gefüllt: Für jedes Gitterelement wird eine Säule von diskretisierten Höhenhypothesen aufgespannt. Jeder, der so entstehenden, hypothetischen 3D-Punkte wird dann in alle verfügbaren Mehrfachbasislinien-Datensätze beliebiger Blickwinkel projiziert. An der korrespondierenden Stelle im Bilddatensatz wird die Kovarianzmatrix des entsprechenden Pixels extrahiert und als Beobachtung in eine Wahrscheinlichkeitsfunktion integriert. Bildet man dann die gemeinsame Wahrscheinlichkeitsfunktion aller Aspekte und berechnet für jede Höhenhypothese den resultierenden Wahrscheinlichkeitswert, so lässt sich der Schätzwert der Höhe für das aktuelle Gitterelement im Rahmen einer einfachen Maximum-Likelihood-Schätzung bestimmen. Eine Illustration des Ablaufs dieses in Schmitt & Stilla (2014 b) vorgestellten Verfahrens findet sich in Abbildung 5.

Diese simultane Fusionsstrategie erlaubt trotz ihrer geschlossenen Formulierung noch immer ein Maximum an Flexibilität: Sie kann prinzipiell für beliebige Konfigura-

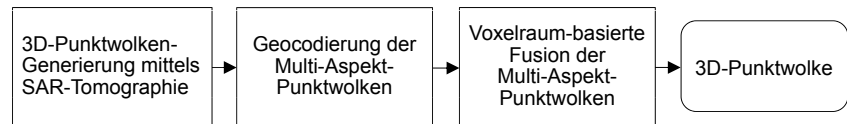


Abbildung 4: Flussdiagramm des 3D-Ansatzes

tionen von InSAR-Daten angewandt werden, egal wie viele Basislinien pro Aspekt oder wie viele Aspekte verfügbar sind. Der Nachteil dieser Methode ist allerdings, dass sie nur ein 2,5-dimensionales Endergebnis liefert und den Layover-Effekt nicht explizit berücksichtigt. Dies führt zu einer geringeren erreichbaren Genauigkeit der Rekonstruktionsergebnisse, insbesondere an den Gebäudekanten, sowie zu einem Nichtvorhandensein von vertikalen Flächen, wie sie in Stadtgebieten häufig anzutreffen sind. Trotzdem konnte in Schmitt et al. (2014) nachgewiesen werden, dass sich eine derartige Fusion von Mehrfachbeobachtungen im Vergleich zu klassischer SAR-Interferometrie positiv auf die erreichbare Rekonstruktionsqualität auswirkt.

## 4 EXPERIMENTE UND ERGEBNISSE

### 4.1 VERWENDETE TESTDATEN

Beide Prozessierungsstrategien, die in diesem Beitrag skizziert wurden, wurden zu Evaluierungszwecken anhand von experi-

mentellen SAR-Daten des deutschen Millimeterwellen-Sensors MEMPHIS getestet. Der Sensor wurde vom Fraunhofer-Institut für Hochfrequenzphysik und Radartechnik FHR im Jahre 1998 entwickelt und der breiteren Öffentlichkeit erstmals 2002 (Schimpf et al. 2002) vorgestellt. Das verwendete Radarsystem operiert im Ka-Band mit einer Trägerfrequenz von 35 GHz, was einer Wellenlänge von 8,55 mm entspricht. Die Auflösung liegt mit ca. 10 cm in Azimut und ca. 17 cm in Entfernungsrichtung klar im Dezimeterbereich. Dadurch, dass der Sensor mit vier übereinander angeordneten Empfängerantennen ausgestattet ist, werden in jedem Überflug simultan vier direkt koregistrierte Aufnahmen derselben Szene aufgenommen.

Als Testgebiet für die durchgeführten Experimente wurde der Stadtteil Maxvorstadt in München gewählt. Das Testgebiet umgibt den Innenstadtcampus der Technischen Universität München (TUM) und enthält in erster Linie dicht gedrängte Gebäudeblocks, aber auch einige größere

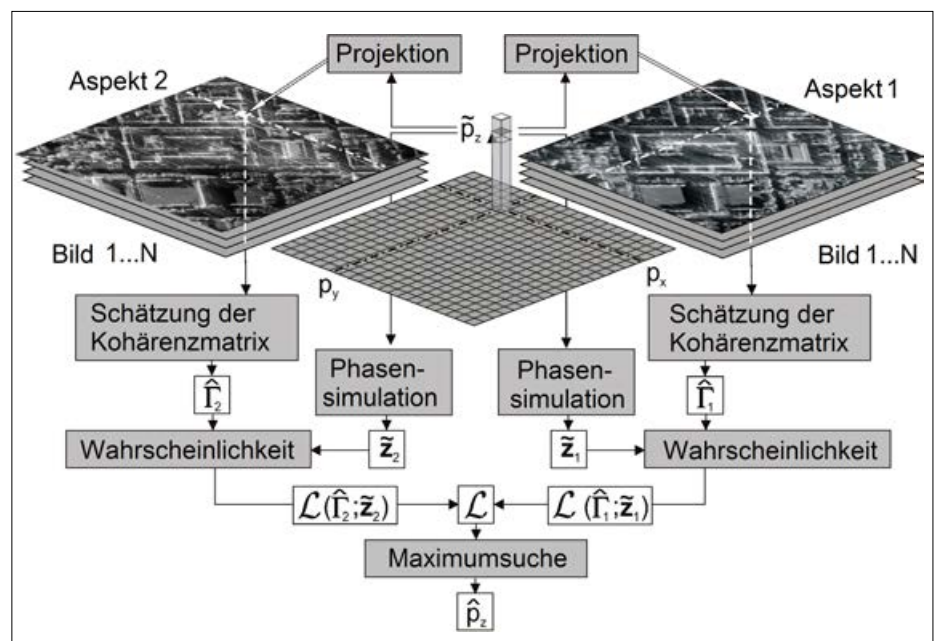


Abbildung 5: Illustration des Ablaufs beim 2,5D-Ansatz. Hier beginnt die Prozessierung im Weltkoordinatensystem, wo der zu rekonstruierende Szenenbereich in diskretisierte Hypothesen aufgeteilt wird. Für jedes Gitterelement wird dann die am wahrscheinlichsten zu den Beobachtungen passende Hypothese als Höhenschätzwert gewählt.

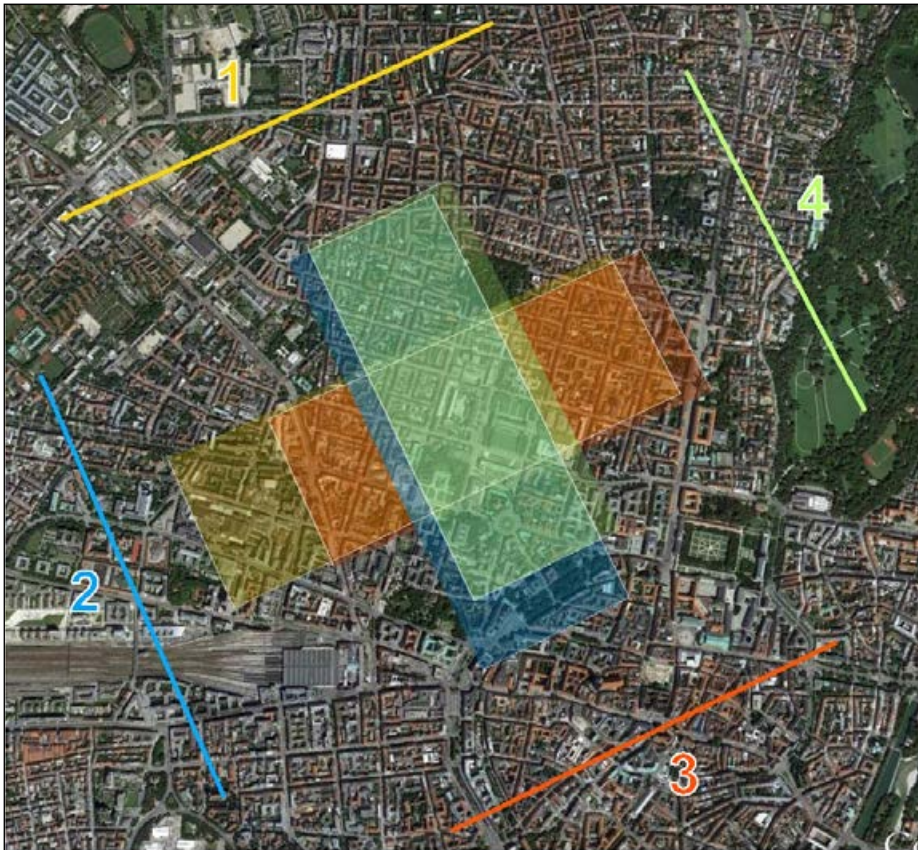


Abbildung 6: Die Flugpfade sowie die zugehörigen SAR-Bildstreifen auf ein optisches Bild (© Google 2013) projiziert

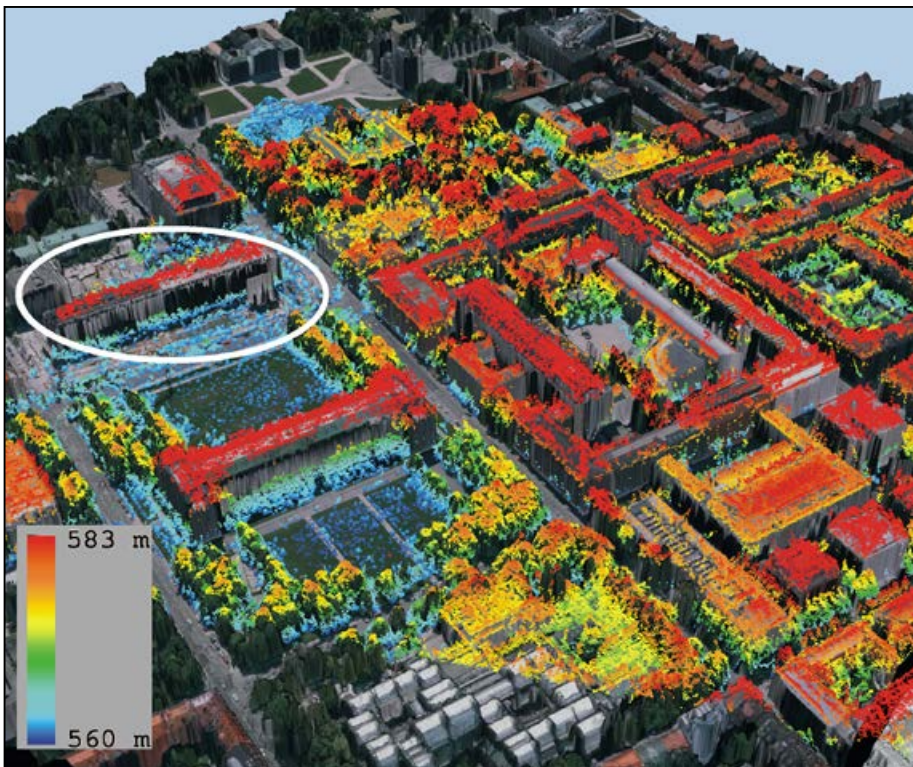


Abbildung 7: Rekonstruktionsergebnis mithilfe des simultanen Fusionsverfahrens aus Schmitt & Stilla (2014b). Der 2,5D-Höhendatensatz wurde als höhencodierte Punktwolke dargestellt und einem texturierten Referenzhöhenmodell überlagert.

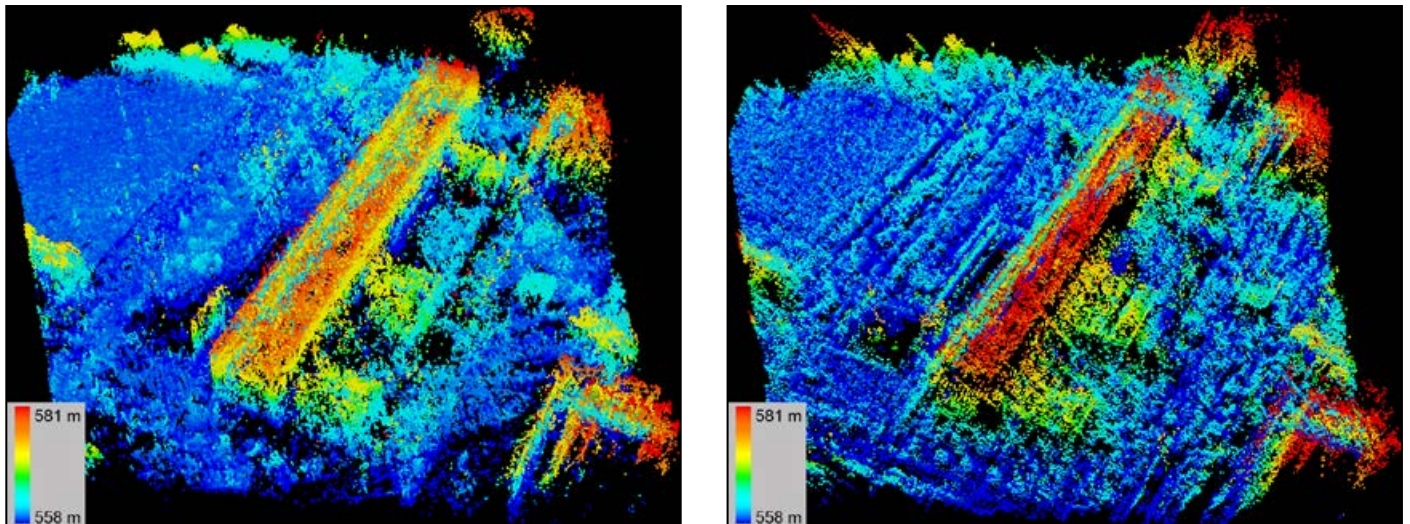
Gebäude, die von Beton oder Rasen umgeben werden, sowie viele städtische Bäume. Ein optisches Bild der Szene findet sich in Abbildung 6.

Die Messkampagne wurde im Mai 2011 in Kooperation mit der Universität Zürich (Remote Sensing Laboratories) und dem Fraunhofer FHR durchgeführt. Dabei wurde die Szene, wie in Abbildung 6 gezeigt, von einer Multi-Aspekt-Konfiguration aus vier verschiedenen Blickrichtungen aufgenommen, wobei sich das Testgebiet auf den von allen Bildstreifen überdeckten Bereich beschränkt.

#### 4.2 REKONSTRUKTIONSERGEBNISSE

Abbildung 7 zeigt ein aus LiDAR-Daten gewonnenes und mithilfe eines Orthophotos texturiertes Referenzhöhenmodell, das mit einer nach Höhenwerten farbcodierten InSAR-Punktwolke überlagert wurde. Diese InSAR-Punktwolke wurde aus den vier Multi-Aspekt-Datensätzen der MEMPHIS-Kampagne 2011 mittels des in Abschnitt 3.2 skizzierten simultanen Fusionsverfahrens hergestellt.

Zur genaueren, auch quantitativen, Evaluierung der beiden Verfahren wurde das in Abbildung 7 markierte Gebäude einer detaillierteren Untersuchung unterzogen (Schmitt & Stilla 2014 c). Die beiden zugehörigen Punktwolkenausschnitte werden in Abbildung 8 gezeigt. Es sticht sofort die bessere Qualität sowie das vollständigere Rekonstruktionsergebnis des TomoSAR-basierten 3D-Ansatzes ins Auge: Insbesondere die Gebäudefassaden sowie die frei stehende Wand am linken Ende der Fassade sind in diesem Fall angemessen rekonstruiert worden, während sie beim 2,5D-Ergebnis weitestgehend fehlen. Die insgesamt höhere Qualität des 3D-Verfahrens lässt sich auch quantifizieren; die zugehörigen numerischen Evaluierungsergebnisse sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Dazu wurde ein Abgleich mit einer aus LiDAR-Messungen gewonnenen Referenzpunktwolke durchgeführt, wobei jeweils der Median der Abstände aller rekonstruierten InSAR-Punkte zum jeweils nächstgelegenen LiDAR-Punkt, zur jeweils nächstgelegenen aus drei LiDAR-Punkten berechneten Ebene sowie zur jeweils nächstgelegenen aus zehn Punkten geschätzten ausgleichenden Ebene berechnet wurden. Dies ermöglicht eine relativ gute Abschätzung der potenziell erreichbaren



a) **Abbildung 8:** Ausschnitte aus den rekonstruierten Punktwolken: a) das auf TomoSAR-Punktwolkenfusion basierende 3D-Ergebnis; b) das auf simultaner Multi-Aspekt-Multi-Baseline-Datenfusion basierende 2,5D-Ergebnis

ren Genauigkeiten, die sich also für den 2,5D-Ansatz im Meter-, für den 3D-Ansatz sogar im Dezimeterbereich befinden.

## 5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In diesem Beitrag wurde demonstriert, wie aus interferometrischen SAR-Daten flugzeuggetragener Systeme unter Ausnutzung von Mehrfachbeobachtungen flächendeckende 2,5D- bzw. 3D-Punktwolken urbaner Gebiete generiert werden können. Dazu wurden exemplarisch zwei neuartige Verfahren skizziert. Obwohl die erreichbaren Genauigkeiten noch nicht denen von klassischer Luftbildphotogrammetrie oder flugzeuggetragenem Laserscanning entsprechen, zeigen die vorgestellten Verfahren in Verbindung mit modernen Radarsensoren interessante Perspektiven auf: Insbesondere wird so erstmals eine tageszeit- und wetterunabhängige 3D-Geodatengewinnung

in zeitkritischen Szenarien ermöglicht, wie sie z. B. bei der schnellen Kartierung von Katastrophengebieten erforderlich wird, wenn es notwendig ist, technischen Hilfskräften detaillierte Informationen über die betroffenen Gegenden zur Verfügung stellen zu können. Die damit nun mögliche Ergänzung von Höheninformationen komplementiert gegebenenfalls bereits vorhandenes 2D-Kartenmaterial in idealer Weise und erlaubt eine robustere Interpretation von beschädigter Infrastruktur.

Zukünftige Forschungsarbeiten in diesem Bereich werden nun darauf abstellen, die Oberflächenrekonstruktion nicht erst in der Bodenstation – also nach Aufnahme der Daten in einer Flugmesskampagne – durchzuführen, sondern diese möglichst echtzeitnah zu implementieren, um schon während der Befliegung vorläufige Informationen über das Krisengebiet auswerten zu können. Erste Untersuchungen (z. B.

Palm 2014) zeigen bereits vielversprechendes Potenzial. Eine weitere interessante Anwendung der SAR-Interferometrie in Stadtgebieten ist die Analyse multi-temporalen Daten, die in Zeitreihen wiederkehrender Satellitenüberflüge aufgenommen wurden. In diesem Fall gilt das Interesse nicht primär einer schnellen 3D-Kartierung, sondern der Langzeitbeobachtung von linearen und nichtlinearen Deformationsprozessen (Gernhardt & Bamler 2012), was wiederum wertvolle Beiträge zur Katastrophenprävention liefern kann.

## DANKSAGUNG

Die Autoren danken Thorsten Brehm und Stephan Stanko vom Fraunhofer-Institut für Hochfrequenzphysik und Radartechnik sowie Christophe Magnard und Erich Meier von den Remote Sensing Laboratories der Universität Zürich für Aufnahme und Fokussierung der MEMPHIS-Testdaten.

	3 D	2,5 D
Punktdichte	8,6 Punkte/m <sup>2</sup>	3,7 Punkte/m <sup>2</sup>
Anzahl der rekonstruierten Punkte	290.000	128.000
Median der Abstände zum/zur		
nächsten Punkt	0,76 m	1,44 m
nächsten Ebene	0,49 m	1,02 m
nächsten ausgleichenden Ebene	0,64 m	1,32 m

**Tabelle 1:** Numerischer Vergleich der 3D- und 2,5D-Rekonstruktionsverfahren



## Literatur

- Bamler, R.; Hartl, P. (1998): Synthetic aperture radar interferometry. In: *Inverse Problems*, 14 (4), S. R1-R54.
- Brenner, C. (2005): Building reconstruction from images and laser scanning. In: *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 6 (3-4), S. 187-198.
- Cumming, I. G.; Wong, F. H. C. (2005): *Digital Signal Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation*. Artech House, Norwood.
- Curlander, J. C.; McDonough, R. N. (1991): *Synthetic Aperture Radar – Systems and Signal Processing*. John Wiley & Sons, New York.
- Gernhardt, S.; Bamler, R. (2012): Deformation monitoring of single buildings using meter-resolution SAR data in PSI. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 73, 68-79.
- Haala, N.; Kada, M. (2010): An update on automatic 3D building reconstruction. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65 (6), S. 570-580.
- Hebel, M.; Stilla, U. (2013): Automatische Änderungsdetektion beim vorwärtsblickenden Airborne Laserscanning urbaner Gebiete. In: *gis.SCIENCE*, 2/2013, S. 51-56.
- Kolbe, T. H.; Gröger, G.; Plümer, L. (2005): CityGML: Interoperable access to 3D city models. In: Oosterom, P.; Zlatanova, S.; Fendel, E. (Eds.): *Geo-information for Disaster Management*. Springer-Verlag, Berlin.
- Kraus, K. (2005): Laserscanning und Photogrammetrie im Dienste der Geoinformation. In: Strobl, J.; Blaschke, T.; Griesebner, G. (Eds.): *Angeordnete Geoinformatik 2005 – Beiträge zum 17. AGIT-Symposium Salzburg*. Wichmann Verlag, Berlin/Offenbach.
- Mayer, H. (1999): Automatic object extraction from aerial imagery – a survey focusing on buildings. In: *Computer Vision and Image Understanding*, 74 (2), S. 138-149.
- Palm, S.; Johannes, W.; Pohl, N.; Stilla, U. (2014): Monitoring weitreichender Gebiete durch SAR-Video Echtzeitprozessierung auf Kleinflugzeugen. In: *DGPF Tagungsband*, 23 (CD-ROM).
- Reigber, A.; Moreira, A. (2000): First demonstration of airborne SAR tomography using multibaseline L-band data. In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38 (5), S. 2142-2152.
- Schimpf, H.; Essen, H.; Boehmsdorff, S.; Brehm, T. (2002): MEMPHIS – a fully polarimetric experimental radar. In: *Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, S. 1714-1716.
- Schmitt, M. (2014): *Reconstruction of Urban Surface Models from Multi-Aspect and Multi-Baseline Interferometric SAR*. PhD Thesis, Technische Universität München.
- Schmitt, M. (2015): Three-dimensional reconstruction of urban areas by multi-aspect TomoSAR data fusion. In: *Proceedings of Joint Urban Remote Sensing Event (CD-ROM)*.
- Schmitt, M.; Stilla, U. (2014a): Maximum-likelihood based approach for single-pass synthetic aperture radar tomography over urban areas. In: *IET Radar, Sonar & Navigation*, 8 (9), S. 1145-1153.
- Schmitt, M.; Stilla, U. (2014b): Maximum-likelihood estimation for multi-aspect multi-baseline SAR interferometry of urban areas. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 87, S. 68-77.
- Schmitt, M.; Stilla, U. (2014c): Comparison of multi-aspect multi-baseline SAR interferometry and multi-aspect TomoSAR reconstruction results. In: *Proceedings of 9th European Conference on Synthetic Aperture Radar*, 501-504.
- Schmitt, M.; Schönberger, J.; Stilla, U. (2014): Benefit of using multiple baselines and multiple aspects for SAR interferometry of urban areas. In: *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7 (10), S. 4107-4118.
- Sörgel, U. (2010): *Radar Remote Sensing of Urban Areas*. Springer-Verlag, Berlin.
- Stilla, U.; Hinz, S.; Hedman, K.; Wessel, B. (2007): Road extraction from SAR imagery. In: Weng, Q. (Ed.): *Remote Sensing of Impervious Surfaces*. CRC Press, Boca Raton.
- Stilla, U.; Schmitt, M.; Maksymiuk, O.; Auer, S. (2014): Towards the recognition of individual trees in decimeter-resolution airborne millimeter-wave SAR. In: *Proceedings of 8th IAPR Workshop on Pattern Recognition in Remote Sensing (CD-ROM)*.
- Thiele, A.; Thoennessen, U.; Cadario, E.; Schulz, K.; Sörgel, U. (2007): Building recognition from multi-aspect high resolution InSAR data in urban area. In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45 (11), S. 3583-3593.