

Nutzung von Nachbarschaftsinformationen zur Validierung der SAR-Tomographie

LUKAS SCHACK¹, UWE SÖRGEL¹

Hochaufgelöste SAR-Daten bieten Bodenauflösungen im Bereich weniger Meter. Aufgrund der Schrägbeleuchtung kommt es besonders in urbanen Gebieten zu sogenannten Layover-Effekten. Dabei werden Signalanteile mehrerer Streuer unterschiedlicher Elevationen in dieselbe Auflösungszelle abgebildet. Das Ziel der Tomographie in SAR-Daten ist es, diese zu trennen und in einem weiteren Schritt bestimmten Objekten, wie beispielsweise einer Gebäudefassade, zuzuordnen. Somit kann die Auswertung von SAR-Daten um eine dritte Raumdimension, der Elevation, erweitert werden, was vielfältige Anwendungen ermöglicht. Für die Validierung werden Nachbarschaftsinformationen in Form von Elevations-Profilen über das Layover-Gebiet herangezogen. Da die SAR-Aufnahmegeometrie parallelenhaltend ist, kann angenommen werden, dass sich Geraden entlang von Objekten in den Elevations-Profilen wiederfinden lassen. Es zeigt sich, dass die Nutzung dieser Information die TomoSAR-Ergebnisse verbessert.

1 Einleitung

Die SAR-Sensoren der neueren Generation, wie beispielsweise TerraSAR-X, bieten Bodenauflösungen von bis zu 1 m x 1 m, was eine Identifizierung von Gebäudestrukturen zulässt. Aufgrund der Schrägbeleuchtung bei SAR-Sensoren kommt es besonders in urbanen Gebieten zu Überlappungseffekten (Layover), wobei sich Signalanteile verschiedener Objekte vermischen. Dies sind in Städten häufig Gebäude, deren Signale sich mit denen des Bodens mischen. Eine Herausforderung für hochaufgelöste SAR-Daten liegt daher in der Gewinnung von Informationen über die dritte Raumdimension, der Elevation. Dies ist die Motivation für Tomographie in SAR-Daten (TomoSAR), bei der mehrere Aufnahmen derselben Szene genutzt werden, um die dreidimensionale Geometrie der darin enthaltenen Objekte zu rekonstruieren. Dabei unterscheiden sich die Aufnahmepositionen nur geringfügig, da sich die Positionen des TerraSAR-X-Satelliten beim wiederholten Überfliegen einer Szene um maximal 500 m unterscheiden [D'AMICO2004]. Diese genaue Positionierung ist für viele Anwendungen vorteilhaft, führt aber bei TomoSAR zu einer Begrenzung der Elevationsauflösung ρ_s . Diese ist ähnlich wie die Azimutauflösung beugungsbegrenzt:

$$\rho_s = \frac{\lambda r}{2\Delta b_{\perp}} \quad (1)$$

mit: λ : Wellenlänge
 r : Abstand Sensor – Objekt
 Δb_{\perp} : Gesamtausdehnung der rechtwinkligen Basislinie

Für den vorliegenden Stapel von 20 High Resolution Spotlight Aufnahmen des Stadtgebietes Berlin mit einer Basislinienausdehnung von rund 418 m und einer durchschnittlichen Objektentfernung von 583 km ergibt das eine Elevationsauflösung von $\rho_s \approx 22$ m. Es können also nur Streuer innerhalb einer Auflösungszelle getrennt werden, die in Elevationsrichtung

1) Lukas Schack und Uwe Sörgel, Institut für Photogrammetrie und Geoinformation, Leibniz Universität Hannover, Nienburger Straße 1, 30167 Hannover
 E-Mail: schack@ipi.uni-hannover.de, soergel@ipi.uni-hannover.de

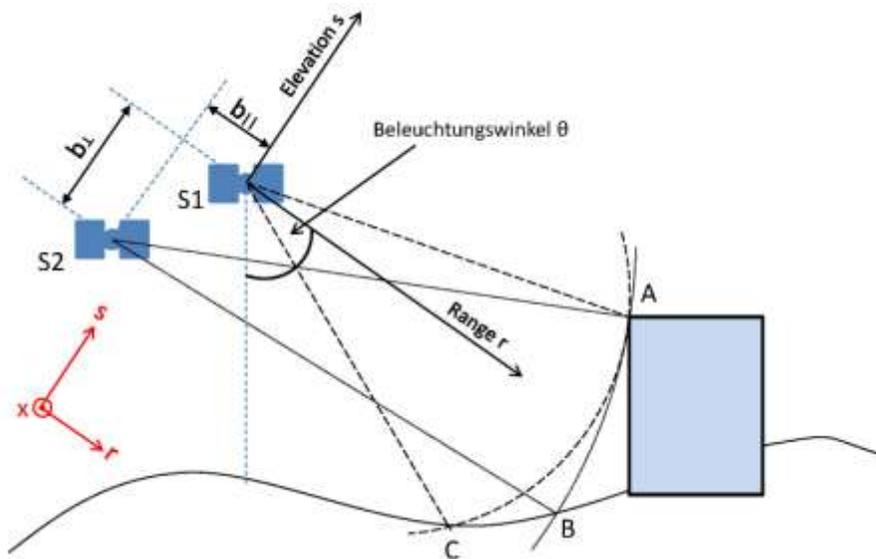


Abb. 1: TomoSAR Aufnahmegeometrie

weiter als 22 m voneinander entfernt sind. Es existieren jedoch auch Ansätze, die nicht beugungsbegrenzt sind und bereits erfolgreich genutzt werden [ZHU2010A].

Die mathematisch-physikalische Beschreibung der SAR-Aufnahmegeometrie ist ausführlich in [FORNARO2003] zu finden und soll hier nur kurz dargestellt werden. Der Radarsatellit sendet zu einem Zeitpunkt ein gerichtetes Signal aus, welches sich wellenförmig ausbreitet. Das von den Objekten auf der Erdoberfläche reflektierte Signal wird vom Satelliten über dieselbe Antenne empfangen und verarbeitet. Dabei findet eine Projektion der beleuchteten dreidimensionalen Objekte in ein zweidimensionales Bildkoordinatensystem statt. In Abbildung 1 ist die Aufnahmegeometrie sowie das verwendete Koordinatensystem dargestellt. Die Azimutrichtung x fällt mit der Flugrichtung des Satelliten zusammen. Dazu orthogonal und in Blickrichtung des Sensors ist die Rangerichtung r definiert. Das Koordinatensystem wird komplettiert durch die Elevationsrichtung s . Bei der SAR-Prozessierung werden alle beleuchteten Objekte, die gleichweit vom Sensor entfernt sind, in eine Auflösungszelle abgebildet (vgl. Punkte A und C für Satellit S1 in Abbildung 1). Durch Ausnutzung von N Aufnahmen derselben Szene können diese Mehrdeutigkeiten aufgelöst werden. Alle Aufnahmen sind georeferenziert und auf eine gemeinsame Aufnahme, den „Master“, bezogen. Das gemessene Signal einer Aufnahme g_n wird dann durch

$$g_n = \int_{-a}^a \gamma(s) e^{j2\pi f_n s} ds \quad (2)$$

$$f_n = \frac{2b_{\perp,n}}{\lambda r}$$

- mit:
- a ... a: Suchbereich in Elevationsrichtung
 - s: Elevation
 - $\gamma(s)$: Elevationsabhängiges Reflexionsprofil
 - $b_{\perp,n}$: Rechtwinklige Basislinie der Aufnahme n
 - λ : Wellenlänge
 - r: Abstand Sensor – Objekt

beschrieben und ist das Integral aller Streuteile in einer Auflösungszelle [FORNARO2003]. Der Suchbereich in Elevationsrichtung kann für urbane Gebiete eingeschränkt werden, wenn die maximale vorkommende Gebäudehöhe bekannt ist. Die Wellenlänge, die rechtwinkligen Basislinien sowie der Abstand des SAR-Sensors zu den Objekten sind bekannt. Somit bleibt als einzige Unbekannte das elevationsabhängige Reflexionsprofil übrig. Die Zahl der Streuer K , die signifikante Beiträge am Gesamtsignal einer Auflösungszelle haben, lässt sich einschränken: In Layover-Gebieten vermischt sich beispielsweise häufig das Signal der Fassade mit dem Signal des Bodens. Für die Rekonstruktion des Reflexionsprofils genügt in solchen Fällen die Modellierung der zwei stärksten Streuer. Somit vereinfacht sich Gleichung (2) zu:

$$g_n = \sum_{k=1}^K \gamma_k e^{j2\pi f_n s_k} \quad (3)$$

Das Reflexionsprofil hat nun an K Stellen eine von Null verschiedene und zu schätzende Amplitude γ_k mit den zugehörigen Elevationen s_k . Wird der Elevationsraum in 0,5 m-Schritten auf 200 m eingegrenzt, ergeben sich 401 zu bestimmende Unbekannte. Das Problem ist somit stark unterbestimmt, da aus 20 komplexwertigen Aufnahmen 401 komplexe Größen geschätzt werden sollen. Um dennoch eine Lösung zu erhalten, muss Vorwissen eingeführt oder spezielle Zusammenhänge zwischen dem gemessenen Signal und dem gesuchten Reflexionsprofil ausgenutzt werden.

2 Inversionsansätze

Der mögliche Elevationsraum ist limitiert und diskretisiert, das heißt, gesucht ist die Amplitude an endlich vielen, diskreten Stellen. Das zu lösende Problem lässt sich ausdrücken als

$$\vec{g} = L\vec{\gamma} \quad (4)$$

wobei L den linearen Operator darstellt, der das gemessene Signal \vec{g} in das Reflexionsprofil $\vec{\gamma}$ überführt. Die vollbesetzte Matrix L enthält alle möglichen Kombinationen aus Basislinien und Elevationen innerhalb des vorher definierten Suchbereichs und ist somit nur von der Aufnahmegeometrie abhängig. Um das optimale Reflexionsprofil aus der gegebenen Geometrie zu invertieren, existieren verschiedene Ansätze:

- **Singulärwertzerlegung**

Gleichung (2) zeigt, dass das gemessene Signal g_n die inverse Fouriertransformation des gesuchten Reflexionsprofils $\gamma(s)$ im Falle gleichabständiger Basislinien ist [FORNARO2003]. Somit ist die Rekonstruktion des Reflexionsprofils gleichbedeutend mit der Gewinnung des Amplitudenspektrums der gemessenen Signale. Eine Möglichkeit dafür ist die Singulärwertzerlegung des Operators L . Dies hat gegenüber der direkten Fouriertransformation den Vorteil, dass Effekte aufgrund der ungleichmäßigen Basislinienverteilung verringert werden können [ZHU2010B]. Die Singulärwertzerlegung erlaubt eine Aufteilung des Gesamtsignals in „verlässliche“ und „unzuverlässige“ Signalanteile in Abhängigkeit der Größe der zugehörigen Singulärwerte. Das rekonstruierte Reflexionsprofil setzt sich dann als Linearkombination derjenigen Singulärvektoren zusammen, deren zugehörigen Singulärwerte kleiner als ein Schwellwert sind. Diese Methode wird abgeschnittene Singulärwertzerlegung oder Truncated Singular Value Decomposition, TSVD, genannt.

- **Schätzung nach kleinsten Quadraten**

Bei der Schätzung nach kleinsten Quadraten wird das Ausgangsproblem parametrisiert und die Unbekannten in lineare und nichtlineare Terme aufgeteilt. Dabei sind die unbekanntes Elevationen der Streuer s_k in den nichtlinearen Termen der Designmatrix enthalten. Da jedoch nicht nur die Amplituden sondern auch die Elevationen der Streuer von Interesse sind, wird eine zweistufige Ausgleichung durchgeführt. Zunächst wird eine K-dimensionale Parameterraumsuche durchgeführt, wobei K die a priori festgesetzte Anzahl der Streuer ist. Dabei werden alle im Suchraum liegenden Kombinationen von Elevationen getestet. Sind die K optimalen Elevationen \hat{s} gefunden, können die zugehörigen Amplituden geschätzt werden. Ein wesentlicher Vorteil der Schätzung nach kleinsten Quadraten stellt die Unabhängigkeit von der beugungsbegrenzten Auflösung gegenüber den auf der Spektralzerlegung basierenden Verfahren dar. Einzig das in den Beobachtungen enthaltene Rauschen limitiert das Auflösungsvermögen dieses Ansatzes. Nachteile des Verfahrens sind die rechenzeitaufwendige K-dimensionale Parameterraumsuche, die die Anwendbarkeit in der Praxis auf zwei Streuer pro Auflösungszelle beschränkt, sowie die nötige Festlegung der Anzahl der Streuer.

- **Compressive Sensing**

Die Annahme, dass sich nur wenige dominante Streuer in einer Auflösungszelle befinden, führt zu einem dünnbesetzten Reflexionsprofil. Compressive Sensing (CS) ist eine Technik, die es ermöglicht, Signale mit bestimmten Eigenschaften dünnbesetzt zu repräsentieren. Im Falle von TomoSAR wird das dünnbesetzte Reflexionsprofil aus nur wenigen Beobachtungen geschätzt. Es liegt ein unterbestimmtes Gleichungssystem vor. Der Ansatz des Compressive Sensing ist es, eine kombinierte L2-L1-Norm-Minimierung durchzuführen. Gesucht ist somit

$$\gamma_{CS} = \arg \min_{\vec{\gamma}} \{ \|\vec{g} - L\vec{\gamma}\|_2^2 + \lambda_K \|\vec{\gamma}\|_1 \} \quad (5)$$

mit: λ_K : Gewichtungsfaktor.

Die L2-Norm minimiert die Residuen zwischen Beobachtungen und Modell (vgl. Schätzung nach kleinsten Quadraten), während die L1-Norm diejenige Lösung aus der beliebig großen Lösungsmenge wählt, die möglichst dünnbesetzt ist. Dies stellt ein komplexes Optimierungsproblem dar, welches sich durch Umformungen linear lösen lässt [DONOHO]. Das Auflösungsvermögen dieses Verfahren ist wie die Schätzung nach kleinsten Quadraten nicht beugungsbegrenzt.

3 Nutzung von Nachbarschaftsinformationen

Für die gewinnbringende Nutzung der dritten Dimension in SAR-Bildern ist die Information aus einer einzelnen Auflösungszelle oft nicht ausreichend, da das Interesse häufig in der flächenhaften Auswertung eines Gebietes liegt. Ein erster Schritt in diese Richtung stellt die Betrachtung von Elevations-Profilen statt einzelnen Auflösungszellen dar. Abbildung 2 zeigt diesen Übergang schematisch.

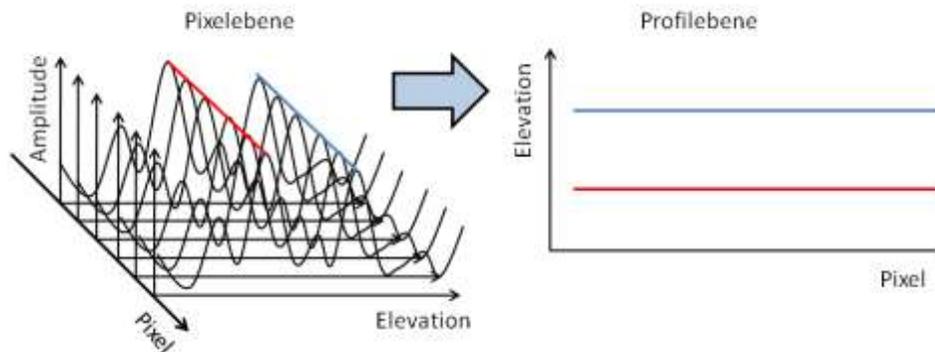


Abb. 2: Übergang auf Profilebene.

In SAR-Aufnahmen erkennbare Gebäudestrukturen sind zumeist Fassaden, deren Fenster horizontal sowie vertikal regelmäßig entlang einer Geraden angeordnet sind. Da die SAR-Aufnahmegeometrie parallelentreu ist, werden Geraden im Objektraum als Geraden in den SAR-Aufnahmen abgebildet. Abbildung 3 zeigt schematisch den Elevationsverlauf zweier Profile, die aufgrund von Layover-Effekten im SAR-Bild nicht trennbar wären. Je nach Orientierung des Profils ergibt sich ein anderer Elevationsverlauf der Objekte. Benachbarte Streuer desselben Objektes liegen auf demselben Geradenabschnitt und haben somit dieselbe Steigung. Auf dieser Eigenschaft basiert die Nutzung von Nachbarschaftsinformationen zur Validierung der Reflexionsprofile.

Das Ziel der Nutzung von Nachbarschaftsinformationen ist die Extraktion von Geradenabschnitten in den Profilen über Fassaden. Vereinzelt Streuer, die eine stark abweichende Elevation von denen ihrer Nachbarn haben, sollen verworfen werden. Auf diese Weise werden Elevationsprofile über Fassaden erhalten, die nur die Streuer beinhalten, die zu fortgesetzten Geradenabschnitten gehören. In einem weiteren Schritt können dann Methoden der Merkmalsextraktion angewandt werden, um beispielsweise die durchschnittliche Elevation einer Fensterreihe zu bestimmen.

Als Nachbarschaft des zu überprüfenden Streuers werden die Streuer in den zwei vorherigen sowie zwei nachfolgenden Auflösungszellen betrachtet. Dabei werden Auflösungszellen übergangen, deren Signal-Rausch-Verhältnis zu gering ist, das heißt, deren Signalphase über den Aufnahmestapel nicht stabil genug sind. Ein Toleranzwinkel δm muss definiert werden, in dem der nächste Streuer liegen muss, damit er zur Gerade gehörig angesehen wird:

$$m_{i-1} - \delta m \leq m_i \leq m_{i-1} + \delta m \quad (6)$$

Ist dies der Fall, wird eine Bewertungsvariable inkrementiert. Ein Streuer wird dann als zu einem Geradenabschnitt gehörig angesehen, wenn dieselbe Steigung mindestens zweimal innerhalb seiner Nachbarschaft gefunden wird. Der Toleranzwinkels δm ist so zu wählen, dass einerseits genügend Streuer zu Geradenabschnitten zusammengeführt werden können und andererseits Ausreißer detektiert werden. Hier bietet sich ein Schwellwert in Abhängigkeit der globalen Varianz der Steigung an. Auch die Größe der lokalen Nachbarschaft hat auf beide Aspekte Einfluss. Es zeigt sich, dass die Betrachtung von insgesamt fünf Auflösungszellen günstig ist, um einerseits eine Robustheit gegenüber Ausreißern zu erreichen und andererseits genügend Flexibilität für die Erfassung von wechselnden Geradenabschnitten bietet.

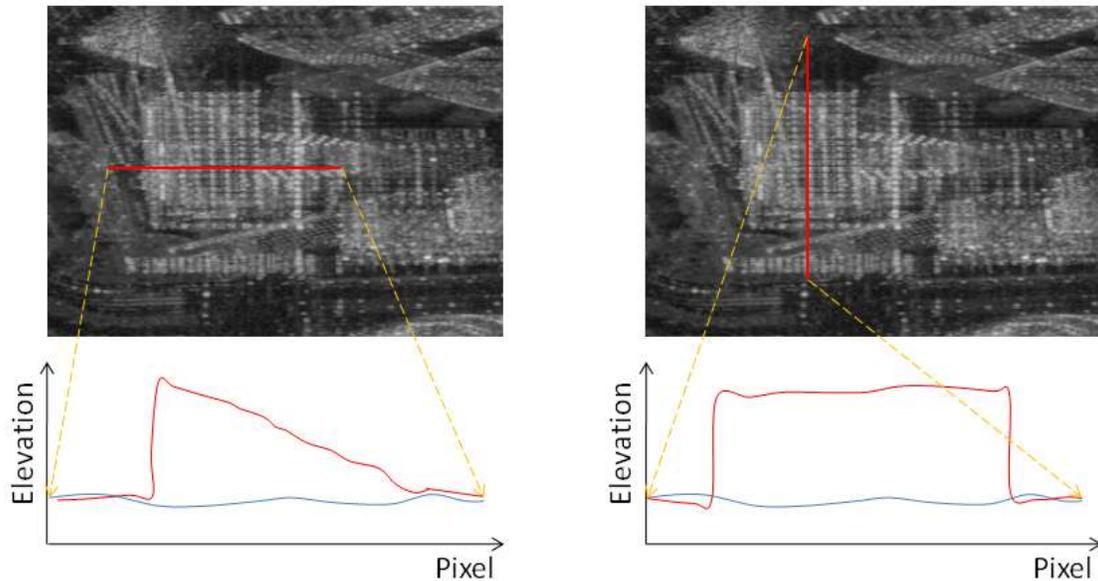


Abb. 3: Elevationsverlauf über Fassade in Layovergebiet. Blau: Signal vom Boden. Rot: Signal vom Gebäude.

4 Ergebnisse

Abbildung 4 zeigt die Ergebnisse der drei vorgestellten Inversionsalgorithmen mit je zwei Streuern in einer Auflösungszelle. Um das Auflösungsvermögen der Algorithmen unter realistischen Bedingungen vergleichen zu können, werden die Signale simuliert und ein gaußverteiltes Rauschen der relativen Amplitude 0,2 addiert. Der Abstand zwischen den beiden Streuern beträgt 50 m (a) beziehungsweise 20 m (b) bei einer konstanten Basislinienausdehnung von 418,5 m. Das auf der Spektralzerlegung basierende Verfahren TSVD liefert ein kontinuierliches und Compressive Sensing ein an nur wenigen von Null verschiedenes Reflexionsprofil. Da bei der Schätzung nach kleinsten Quadraten die Anzahl der Streuer a priori auf zwei festgelegt wurde, liefert dieses Verfahren zwei diskrete Vektoren als Ergebnis. Im Falle der 50 m voneinander entfernten Streuer liefern alle Inversionsalgorithmen die richtigen Elevationen. Das beugungsbegrenzte TSVD hat seine Auflösungsgrenze bei etwa 22 m. Somit können die nur 20 m voneinander entfernten Streuer nicht aufgelöst werden (b). Hier zeigen sich die Vorteile der nicht beugungsbegrenzten Verfahren. Die Schätzung nach kleinsten Quadraten sowie CS können die Streuer trennen. Die teilweise über- oder unterschätzte Amplitude ist hier nur zweitrangig, da das Hauptinteresse der meisten Anwendungen in der Rekonstruktion der Elevation liegt. CS bietet Elevations-Auflösungen von bis zu wenigen Metern in Abhängigkeit vom Rauschen.

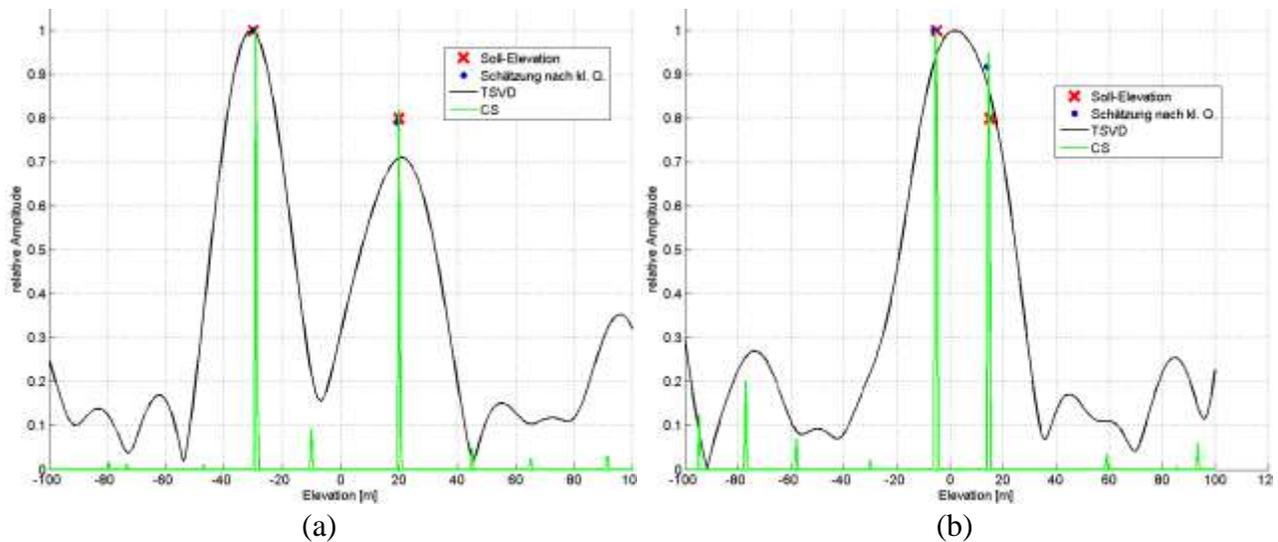


Abb. 4: Reflexionsprofile für Auflösungszelle mit zwei Streuern. (a): Streuer-Elevationen: -30 m und +20 m. Alle Verfahren können die Streuer trennen. (b): Streuer-Elevationen: -5 m und +15 m. Nur die nicht auf der Spektralzerlegung basierenden Verfahren können die Streuer trennen.

Die Nutzung von Nachbarschaftsinformationen bringt eine deutliche Verbesserung der Ergebnisse hinsichtlich der Extraktion von Geradenstrukturen. Abbildung 5 zeigt ein Nord-Süd-Profil über die Fassade des in Abbildung 3 dargestellten Gebäudes. Sowohl Streuer vom Boden als auch vom Gebäude sind als Geraden im Profil zu erkennen. Neben diesen sind Streuer sichtbar, die weder der einen noch der anderen Gerade eindeutig zugeordnet werden können. Nach Ausnutzung der Nachbarschaftsinformation bleiben diejenigen Streuer erhalten, die zusammen mit ihren Vorgängern und Nachfolgern auf einer Geraden liegen.

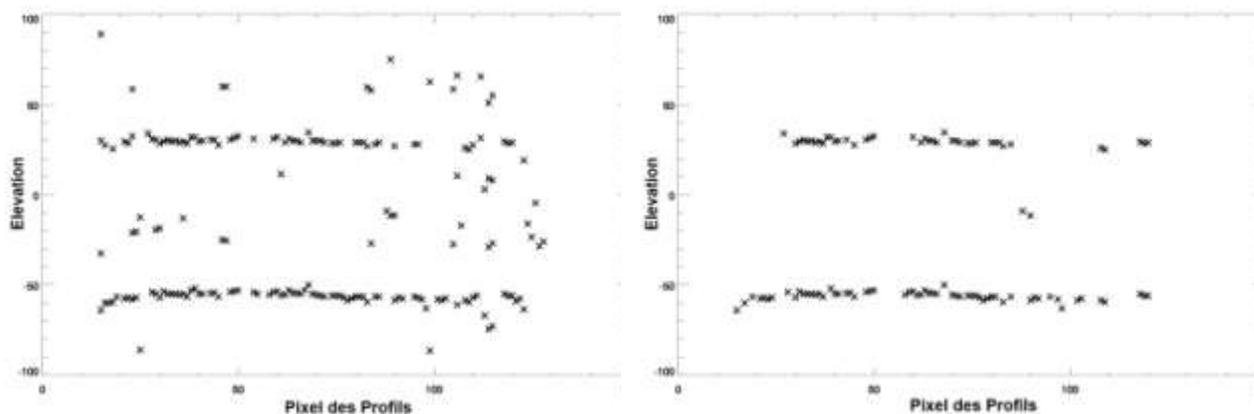


Abb. 5: Profil über Fassade mit (links) und ohne Berücksichtigung der Nachbarschaftsinformationen (rechts).

5 Zusammenfassung und Ausblick

Ein Vergleich der drei vorgestellten Inversionsansätze zeigt, dass das auf der Spektralzerlegung basierende Verfahren für viele Anwendungsgebiete keine genügend hohe Auflösung bietet. Da die Schätzung nach kleinsten Quadraten sehr rechenintensiv ist und die Anzahl der Streuer a priori festgelegt werden muss, bietet Compressive Sensing das größte Potential für die Rekonstruktion dünnbesetzter Reflexionsprofile.

Durch die Nutzung von Nachbarschaftsinformationen können Geradenstrukturen in Elevationsprofilen erfolgreich extrahiert werden. Da Gebäude und andere Strukturen in urbanen Gebieten häufig durch gerade Strukturen beschrieben werden können und das Interesse zumeist in der Extraktion von Gebäudestrukturen aus SAR-Daten liegt, stellt der hier vorgestellte Ansatz einen Beitrag zur verbesserten Nutzung von TomoSAR-Daten dar. In einem weiteren Schritt können auch mehrere Profile parallel über ein Gebäude betrachtet werden und von Geraden auf flächenhafte Informationsextraktion übergegangen werden. Denn auch die Steigungen der Geradenabschnitte mehrerer Profile müssen untereinander in einem ähnlichen Bereich liegen. Dies ist eine mögliche Erweiterung der Nachbarschaftsbetrachtung und bietet Ansatzpunkte für künftige Arbeiten.

6 Literaturverzeichnis

- D'AMICO, S.; ARBINGER, C.; KIRSCHNER, M.; CAMPAGNOLA, S., 2004: Generation of an Optimum Target Trajectory for the TerraSAR-X Repeat Observation Satellite, in: 18th International Symposium on Space Flight Dynamics (ESA Special Publication), Bd. 548, S. 137ff
- Donoho, D., 2006: Compressed sensing, in: IEEE Transactions on Information Theory, Vol 52, No 4, S. 1289-1306
- FORNARO, G.; SERAFINO, F.; SOLDVIERI, F., 2003: Three-dimensional focusing with multipass SAR data, in: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 41, No. 3, S. 507-517
- ZHU, X. X.; BAMLER, R., 2010A: Tomographic SAR Inversion by L1-Norm Regularization – The Compressive Sensing Approach, in: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol 48, No. 10, S. 3839-3846
- ZHU, X. X.; BAMLER, R., 2010B: Very High Resolution Spaceborne SAR Tomography in Urban Environment, in: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol 48, No. 12, S. 4296-4308